UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines (FLASH)

Faculté des Sciences et Techniques (FAST)
Chaire Unesco Science, Technologie et Environnement (CUSTE)

Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espaces, Cultures et Développement »

Mémoire présenté par :

N'TCHA Tinantikpa

Pour l'obtention du Diplôme D'Etudes Approfondies

(DEA)

Spécialité : **Géographie et Gestion de l'Environnement**

OPTION **: GESTION DE L'ENVIRONNEMENT**

N° d'enregistrement/ /EDP/GEN



HYDROGEOCHIMIE DES AQUIFERES ET DES SOLS DANS LA COMMUNE DE NATITINGOU ET ETAT DE LEUR POLLUTION PAR LES METAUX TOXIQUES

Directeur de mémoire

Professeur Moussa BOUKARI

Hydrogéologue (FAST /UAC)

Co-directeur

Docteur Daouda MAMA

Ecochimiste (FAST /UAC)

Soutenu publiquement le 11 octobre 2010

devant le jury composé de :

Président :	**Professeur**	OYEDE L. Marc
Examinateur	**Professeur**	EDORH Patrick
Rapporteurs :	**Professeur**	BOUKARI Moussa
	Docteur	MAMA Daouda

Avec le soutien financier du Conseil Scientifique de l'UAC (Projet 3 AAD « Evolution des Climats, usages des écosystèmes et gestion des risques liés à la pollution par les métaux et les pesticides au Bénin »

***Mention** : Bien*

Année académique 2008-2009

Version corrigée

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES…… IV
LISTE DES TABLEAUX…… VI
LISTE DES PHOTOS…… VII
SIGLES ET ABREVIATIONS…… VIII
AVANT-PROSPOS…… IX
RESUME…… XI
INTRODUCTION…… 1
Chapitre I : Synthèse bibliographique sur les sols, les eaux et les ETM…… 5
1- Définitions et clarifications de certains concepts…… 5
1.1- Les sols…… 5
1.2- Qualité physico-chimique des eaux…… 5
1.2.1- Principaux paramètres physico-chimiques de l'eau et des sols autres que les ETM…… 6
1.2.1.1- Le pH…… 6
1.2.1.2- La température…… 6
1.2.1.3- La conductivité…… 6
1.2.1.4- La dureté de l'eau…… 7
1.2.1.5- Les nitrates…… 7
1.2.1.6- Les nitrites…… 7
1.2.1.7- Les phosphates…… 8
1.2.1.8- Les sulfates…… 8
1.3- Les métaux lourds ou ETM…… 8
1.3.1- Définition et origine des ETM…… 8
1.3.2- Solubilité des ETM dans l'eau…… 9
1.3.3- Distributions spatiales des ETM…… 10
1.3.4- Comportement des ETM dans les sols…… 11
1.3.5- Comportement des ETM en zone minière…… 12
1.4- Spécificités de la pollution des sols et des eaux par quelques principaux métaux lourds…… 13
***1.4.1*- L'arsenic**…… 13
1.4.2- Le mercure…… 14
1.4.3-Le plomb…… 15
1.4.4- Le cadmium…… 16

1.4.5- Conclusion **19**

Chapitre II : Milieu d'étude..... **20**

2.1- Localisation du cadre de l'étude **21**

2.2- Répartition temporelle des saisons..... **21**

2.3- Bilan du bassin hydrologique de la Commune de Natitingou..... **23**

2.4- Bilan de l'humidité du sol dans la Commune de Natitingou..... **25**

2.5- Température..... **27**

2.5.1- Température et humidité relative..... **28**

2.5.2- Température et évapotranspiration potentielle..... **29**

2.6- Contexte géomorphologique et géologique..... **30**

2.6.1- Géomorphologie..... **30**

2.6.2- Géologie..... **30**

2.7- Hydrogéologie..... **31**

2.8- Sols, végétation, hydrographie..... **33**

2.9- Caractéristiques des populations de la Commune de Natitingou..... **33**

2.10- Contexte environnemental actuel du milieu d'étude..... **34**

2.11- Conclusion..... **38**

Chapitre III : Matériels et méthodes..... **40**

3.1- Matériels..... **41**

3.1.1- Le matériel de terrain..... **41**

3.1.2- Le matériel de Laboratoire..... **41**

3.2- Approche méthodologique..... **41**

3.2.1- Recherche documentaire..... **42**

3.2.2- Travaux de terrain **42**

3.2.2.1- Echantillonnage des sols **42**

3.2.2.2- Echantillonnage de l'eau **43**

3.2.3-Travaux de laboratoire..... **45**

3.2.3.1- Analyse des échantillons de sols **45**

3.2.3.2- Analyse des échantillons d'eau. **46**

3.2.3.2.1- Déterminations des ions majeurs..... **46**

3.2.3.2.2- Déterminations des métaux lourds..... **46**

3.2.3.2.3- Traitement informatique des données..... **48**

3.2.3.3- Conclusion..... **49**

Chapitre IV : Résultats et discussions…… 50

4.1- Paramètres physiques et éléments majeurs des eaux souterraines…… 51

4.1.1- Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines…… 51

4.1.2- Eléments chimiques majeurs des eaux et leurs origines…… 54

4.1.2.1- Calcium et Magnésium…… 54

4.1.2.2- Chlorures et Sodium…… 57

4.1.2.3- Les sulfates…… 57

4.1.2.4- Les nitrates…… 58

4.1.2.5- Les fluorures…… 59

4.2- Faciès hydrochimiques des eaux de forages et de puits…… 60

4.3- Teneur en ETM des eaux et des sols…… 63

4.3.1- Teneur en ETM des eaux…… 63

4.3.2- Piézométrie et répartition des ETM…… 68

4.4- Teneur en métaux lourds du sol…… 69

4.5- Conclusion…… 73

CONCLUSION ET PERSPECTIVES …… 74

BIBLIOGRAPHIE…… 76

ANNEXES…… 82

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : Situation géographique de la commune de Natitingou …….. **22**

Fig. 2 : Courbes des précipitations, de l'ETP et de l'ETR…….... **26**

Fig. 3 : Variation des valeurs moyennes mensuelles de la température et de l'humidité relative…… **28**

Fig. 4 : Variation des moyennes mensuelles de la température et de l'ETP…….... **29**

Fig. 5 : Carte géologique de la commune de Natitingou…… **32**

Fig. 6 : Carte d'occupation des sols de la commune de Natitingou…… **36**

Fig. 7 : Répartition spatiale des échantillons de sols ……... **43**

Fig. 8 : Répartition spatiale des points d'échantillonnage d'eau…… ……. **44**

Fig. 9 : Diagramme de Piper des eaux de forage et de puits ……..……. **61**

Fig. 10 : Carte de répartition spatiale des faciès hydrochimiques ……..…….. **62**

Fig. 11 : Variation spatiale de la concentration du cadmium dans les eaux …….. **64**

Fig. 12 : Variation spatiale de la concentration du plomb dans les eaux …… **65**

Fig. 13 : Carte de variation spatiale de la teneur en cadmium des échantillons d'eau analysés ……..... **65**

Fig. 14 : Carte de variation spatiale de la teneur en plomb des échantillons d'eau analysés …… **66**

Fig. 15 : Variation de la concentration du mercure dans les eaux selon les stations …. **67**

Fig. 16 : Carte de variation spatiale de la teneur en mercure des échantillons d'eau analysés…… **67**

Fig. 17 **:** Carte piézométrique de la zone d'étude **……** **68**

Fig. 18 **:** Variation de la teneur en arsenic dans les sols selon les stations **……...** **70**

Fig. 19 **:** Projection sur la carte géologique des points d'échantillonnage de sols, montrant le secteur à échantillons de sols avec concentration en As hors normes OMS…….. **71**

Fig. 20 **:** Variation de la teneur en plomb dans les sols selon les stations…… **72**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Relation entre minéralisation et conductivité selon la réglementation française …….…….. **7**

Tableau II : Relation entre dureté de l'eau et concentration équivalente en $CaCO_3$. ……..…….. **7**

Tableau III : Effets majeurs toxiques et écotoxiques des éléments traces métalliques (Sparks, 1998) ……..……... **18**

Tableau IV : Moyennes mensuelles des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle à la station de Natitingou de 1979 à 2008…… **23**

Tableau V : Calcul des valeurs moyennes des paramètres du bilan à partir des données de précipitations et d'évapotranspiration à la station de Natitingou (période de 1979 à 2008) ……..……..……..…..……. **26**

Tableau VI : Evolution de la température moyenne mensuelle de 1979 à 2008 ……..…… **27**

Tableau VII : Moyennes mensuelles de la température et de l'humidité relative ……. **28**

Tableau VIII : Moyennes mensuelles de la température et de l'évapotranspiration potentielle…… **29**

Tableau IX : Paramètres physico-chimiques des eaux de forage du substratum métamorphique de la zone migmatito-gneissique de la plaine de Perma (Sud de la commune de Natitingou)……..…….….. **52**

Tableau X : Paramètres physico-chimiques des eaux de forage de la zone quartzique…… **53**

Tableau XI : Paramètres physico-chimiques des eaux de forage de la zone schisteuse..... **53**

Tableau XII : Résultats d'analyse des éléments majeurs des eaux de forages……. **55**

Tableau XIII : Résultats d'analyse des éléments majeurs des eaux de puits. Echantillonnées dans la Commune de Natitingou…….…… **56**

Tableau XIV : Matrice de corrélation des différents paramètres de la qualité des eaux de forages et de puits échantionnées……. **58**

Tableau XV : Résultats d'analyse de métaux lourds étudiés..…….…… **64**

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Champ de petits mil…….... **35**

Photo 2 : Buttes préparées pour la culture de l'igname……..... **35**

Photo 3 : Lavage artisanal de d'or……... **37**

Photo 4 : Décapage manuel de la gangue stérile……...…….... **37**

Photo 5 : Chargeuse décapant la gangue stérile…….. **38**

Photo 6 : Gangue stérile entassée……..... **38**

Photo 7 : Une motopompe aspirant l'eau pour le lavage de l'or……..… **38**

SIGLES ET ABREVIATIONS

ASECNA : **A**gence pour la **Séc**urité et la **N**avigation **A**érienne

CE : **C**onductivité **E**lectrique

DEA : **D**iplôme d'**E**tudes **A**pprofondies

DMA : **D**rainage **M**inier **A**cide

ETM : **E**léments **T**races **M**étalliques

FLASH : **F**aculté des **L**ettres, **A**rts et **S**ciences **H**umaines

FAST : **F**aculté des **S**ciences et **T**echniques

ICP : **I**nductively **C**oupled **P**lasma

INSAE : **I**nstitut **N**ational de **S**tatistiques et d'**A**nalyses **E**conomiques

OMS : **O**rganisation **M**ondiale de la **S**anté

SPAD : Logiciel de statistique.

TDS : **S**olides **T**otaux **D**issous

UAC : **U**niversité d'**A**bomey-**C**alavi

AVANT-PROPOS

Ce travail, réalisé dans le cadre du mémoire de DEA en Géosciences de l'Environnement et Aménagement de l'Espace, a été effectué dans le Laboratoire d'Hydrologie Appliquée de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université d'Abomey-Calavi. Il a bénéficié du soutien financier du Conseil scientifique de l'UAC à travers le projet 3AAD de la FLASH et des données d'analyses géochimiques des échantillons de sols de la Société ETRUSCAN couvrant la partie nord de notre domaine d'étude.

Nous prévoyions pour cette étude, compléter les échantillons de sol afin de couvrir l'ensemble de toute la Commune de Natitingou. Les difficultés d'ordre financières nous ont contraint malgré l'appui évoqué plus haut, à nous limiter aux seuls échantillons de sols de la société et d'en faire une étude diagnostique qui servira de base à d'autres études futures. L'analyse de l'arsenic des échantillons d'eau n'a pas pu être effectuée pour défectuosité de l'appareil. Les valeurs obtenues en cadmium pour les sols et en mercure pour les échantillons d'eau après analyse des échantillons n'ont pas permis la construction des graphes pour ces éléments.

Le présent travail, a donc été conduit à terme, grâce à la précieuse contribution scientifique, morale et financière de plusieurs personnes. Qu'il nous soit permis de les remercier.

Nous voudrions de prime abord exprimer notre profonde gratitude à M. Michel BOKO, Professeur Titulaire à l'Université d'Abomey-Calavi qui nous a accepté à l'Ecole Doctorale Pluridisciplinaire et qui a sélectionné notre dossier pour l'appui du projet 3AAD à la présente étude.

Nos remerciements et notre sincère gratitude à l'endroit de M. Moussa BOUKARI, Maître de conférences à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UAC qui nous a tout le temps soutenu et qui a accepté nous encadrer dans la rédaction de ce mémoire.

Remerciements et reconnaissances à l'endroit de M. Mama DAOUDA, Maître Assistant au Département de chimie de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UAC, qui,

malgré ses multiples préoccupations, a accepté spontanément et librement de suivre à terme ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à la Société ETRUSCAN à travers la personne de M. GBAGUIDI Germain qui a accepté mettre à notre disposition les données d'analyses géochimiques des sols.

Nos remerciements à l'endroit de SAMBIENOU W. Gédéon et YANTIKOUA B. Alice pour la campagne d'échantillonnage d'eau et leur participation active aux travaux de laboratoire.

Nos remerciements s'adressent ensuite à tous les enseignants et doctorants du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UAC pour leurs contributions intellectuelles et le soutien moral qu'ils nous ont apporté au cours de ce travail.

Nos sincères remerciements au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée pour son appui financier lors de l'analyse de nos échantillons au Laboratoire. Nos remerciements vont également à l'endroit de Monsieur CHANGOTADE Odilon, qui a fait l'analyse de tous les éléments majeurs et de certains ETM, pour nos échantillons d'eau.

Notre profonde gratitude à l'endroit de l'honorable N'DAH Antoine N'dah, pour son assistance financière à la réalisation de ce mémoire.

Nous pensons également à tous les enseignants et au personnel administratif de l'EDP et du CIFRED pour leur contribution à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, toute notre gratitude à nos parents qui nous ont encouragé et soutenu.

RESUME

Les activités socioéconomiques telles que l'agriculture, l'élevage et l'orpaillage contribuent à la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la Commune de Natitingou. Au cours de ce travail, nous avons dans un premier temps, fait la caractérisation chimique des eaux souterraines en ce qui concerne les paramètres physico-chimiques et dans un second temps, l'état de pollution par les métaux lourds toxiques tels que l'arsenic, le mercure, le plomb, le cadmium dans les eaux souterraines et le sol. L'analyse des éléments majeurs des échantillons d'eau s'est faite par chromatographie ionique (chromatographe DIONEX-ICS 1000) au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) de la Faculté des Sciences et Techniques de l'UAC. Pour la détermination des ETM des échantillons d'eau, le mercure a été dosé au Laboratoire de contrôle de qualité des eaux et aliments de la Direction de l'Hygiène et de l'Assainissement de Base (DHAB) tandis que le cadmium et le plomb ont été analysés au LHA respectivement par la méthode du nitrophényl phénylazophényltriazène (1.01745.0001 MERCK) et la méthode azérosorcine pyridylique (PAR) (1.09717.0001 MERCK). L'analyse des ETM des échantillons de sols, s'est faite à l'eau régale + ICP au laboratoire Abilab à Ouagadougou.

Il ressort de la présente étude, que les eaux souterraines de la Commune de Natitingou, sont généralement acides avec un pH variant entre 4,1 et 7,3. Les conductivités des échantillons d'eau analysés, ont varié entre 40 µS/cm et 1661µS/cm. Les eaux de certains points d'eau ont donc présenté des minéralisations faibles (<100 µS/cm) et d'autres ont présenté des minéralisations élevées (> 1000 µS/cm). Les principaux faciès hydrochimiques identifiés sont représentés par des faciès bicarbonatés calciques et bicarbonatés sodiques. On note également des faciès chlorurés calciques et chlorurés sodiques.

Les résultats d'analyse de métaux lourds dans les échantillons d'eau montrent qu'en ce qui concerne le cadmium, les valeurs restent inférieures à la norme OMS de qualité de l'eau potable (5 µg/L) et quant au plomb, quelques points ont présenté des valeurs supérieures à cette norme (0,05 mg/L). En ce qui concerne le mercure, tous les échantillons analysés ont donné des valeurs au-dessus de la norme OMS (1 µg/L). Pour les sols, les résultats montrent des concentrations assez variables de plomb mais qui restent,

dans l'ensemble des échantillons analysés inférieures à la norme OMS fixée à 100 ppm. Elles sont également variables pour l'arsenic et le mercure dépassant parfois les normes OMS fixées respectivement à 40 ppm et 1ppm (1ppm = 1mg/L). L'impact sanitaire de la consommation des eaux contaminées par les polluants concernés par cette étude, fera l'objet de la suite de ce travail.

Mots clés : Métaux lourds, orpaillage, eau régale, chromatographie ionique, faciès hydrochimique, Perma

ABSTRACT

The socio-economic activities such as agriculture, livestock, gold mining activities, etc., trigger the deterioration of groundwater quality in the Municipality of Natitingou. In this work, we performed, at first place the chemical characterization of groundwater by measuring the physico-chemical parameters and secondly the assessment of highly toxic heavy metals pollution (arsenic, mercury, lead, cadmium) in groundwater and soil. Furthermore, the analysis of major elements of water samples was achieved by ion chromatography (chromatographer DIONEX ICS-1000) at the Laboratory of Applied Hydrology (LHA) of the Faculty of Science and Technology of Abomey-Calavi University (UAC). For the determination of ETM of water samples, mercury was determined at the laboratory of water and food quality control of Hygiene and Basic Sanitation Direction (DHAB) while cadmium and lead were analyzed by LHA method respectively nitrophenyl -phénylazophenyltriazene (Merck 1.01745.0001) and azerosorcine pyridyl (PAR) (Merck 1.09717.0001) method. Analysis of MTE of soil samples, was performed in ICP aqua regia Abilab Laboratory in Ouagadougou.

The study revealed that groundwater in the Municipality of Natitingou, are generally acidic with pH ranging from 4.1 to 7.3. Conductivity values of all samples are between 40 µS / cm and 1661µS/cm. Thus the water present from low to high mineralization. The main hydrochemical facies identified are represented by calcium bicarbonates and sodium bicarbonates facies. Also there are chlorously calcic chlorinated and chloriously sodium. Facies.

Concerning heavy metals analysis, the results revealed that for cadmium, the values were below the WHO standard for safe drinking water (5 mg / L) and about lead, several areas have concentrations above WHO standard (0.05 mg / L). Regarding mercury, all the samples showed contents above the WHO standard (1 mg / L). For soils, the results showed quite variable levels of lead that were below WHO standards. Arsenic and mercury showed also variable levels of concentrations that were sometimes above WHO standards respectively 40 and 1 ppm (1ppm = 1mg/L).

Key words: heavy metals, hydrochemical facies, Perma, pollution. Gold mining activities

INTRODUCTION

L'importance de l'eau en général dans la vie de tout être vivant, et de l'eau potable en particulier, n'est plus à démontrer. L'eau est source de vie a-t-on coutume de dire et sans eau, il n'y a pas de vie (Samake, 2002). L'être humain, quelle que soit la couche sociale à laquelle il appartient, la région où il se trouve, éprouve toujours le besoin de cette ressource, non seulement pour son alimentation, mais aussi pour ses diverses activités. Les eaux souterraines des nappes captives et libres constituent des ressources exploitées par l'homme pour divers usages (Prasad, 2004).

La qualité chimique d'une eau issue du milieu naturel superficiel et souterrain, est très variable. Elle est étroitement liée à la géologie et à des substances réactives qu'elle rencontre lors de son écoulement. Banks et *al* (1994) ont démontré que la composition des eaux pouvait varier de façon notable selon le type de roches dont elles sont extraites, même au sein de roches ignées et métamorphiques de composition similaire. En particulier, selon Jain 2005 in Martini 2009, la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique, détermine sa qualité. Cette qualité peut être altérée lorsque des substances extérieures entrent en contact avec l'aquifère (Martini, 2009). C'est le cas des substances indésirables, voire toxiques (les polluants chimiques minéraux ou organiques), qui rendent alors l'eau souterraine impropre pour divers usages, notamment comme eau de boisson.

De façon générale, ces substances indésirables proviennent de l'utilisation intensive des ressources naturelles et de l'accroissement de certaines activités humaines, qui engendrent de graves problèmes pour la qualité des eaux souterraines et superficielles (Foster, 1995). La planète Terre, sur laquelle la vie est possible, renferme en effet, plusieurs substances utiles pour l'Homme. Les activités minières sont parfois, et ce pour de longues durées, des piliers fondamentaux de l'économie des pays dont la nature a gracieusement doté d'abondantes ressources minières. Parmi ces activités, l'exploitation des substances utiles comme l'or, le diamant, l'aluminium etc, occupe une place importante dans la plupart des pays miniers. Les mesures réglementaires souvent associées à ces exploitations minières, visent l'intensification de la production des substances, souvent sans prendre en compte la dimension environnementale. La découverte d'un gisement de l'un des éléments ci-dessus cités, s'accompagne toujours d'une ruée d'exploitants (légaux et clandestins) aussi bien dans les pays développés que dans les pays en développement. Cette exploitation a toujours

d'incidences sérieuses sur l'environnement. Du point de vue environnemental, l'exploitation aurifère par exemple, constitue un facteur de pression majeur, susceptible de provoquer une dégradation significative de l'état écologique.

Au Bénin, le sous-sol de certains des départements de la région septentrionale, renferment des indices de minéralisations d'or (un métal inaltérable très précieux et très recherché dans le monde entier) dont un gisement a été identifié dans le département de l'Atacora et plus précisément dans la localité de Perma, suite aux nombreux travaux de prospections et de recherches géologiques menés en 1936 par Pinget puis en 1938 par Cheremette (Vincent, 1962). L'exploitation de ce gisement d'or n'épargne pas cette localité des problèmes environnementaux puisqu'aucune mesure n'a été prise en amont pour prévenir les conséquences environnementales de cette activité. En effet, Houndonougbo, 2007 et Tohngodo, 2008 ont signalé sur le site d'orpaillage de Perma, la présence de métaux lourds, notamment ceux de forte toxicité dans les sols et eaux du site même et des zones environnantes.

En outre, la Commune de Natitingou est l'une des Communes où l'agriculture est la principale activité socio-économique (Afrique Conseil, 2006), laquelle agriculture pourrait jouer un rôle considérable sur la qualité de l'eau. Elle peut être à l'origine de pollutions diffuses (nitrates, matières en suspension, pesticides…), et affecter la qualité des eaux, qu'elles soient superficielles ou souterraines. En résumé, la qualité de l'eau peut être considérablement détériorée, notamment en raison de l'intensification de l'agriculture et des types des pratiques culturales. Diverses activités menées par les populations ne respectent donc pas les normes environnementales requises et par conséquent, fournir de l'eau saine pour la consommation humaine devient de plus en plus un problème au Bénin en l'occurrence, du fait de la contamination chimique des nappes.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la recherche de solution pour remédier à cet état de chose. Il est intitulé « Hydrogéochimie des aquifères et des sols dans la Commune de Natitingou et état de leur pollution par les métaux lourds » et se propose de contribuer à une caractérisation chimique des eaux souterraines de la commune de Natitingou, en ce qui concerne notamment les paramètres physico-chimiques et la teneur en métaux lourds (arsenic, mercure, plomb, cadmium). Cette étude permettra de dégager le risque sanitaire lié à la consommation de ces eaux et de proposer des comportements et modes de gestion qui éliminent ou minimisent et qui soient compatibles avec l'exploitation durable des ressources.

Comme hypothèses de ce travail,

- les pratiques agricoles de la commune de Natitingou et les techniques d'orpaillage artisanal et semi-industriel sur le site de Perma, font appel à des produits à base des ETM hautement toxiques comme l'arsenic, le mercure et le plomb ;
- les ETM sont également libérés à partir des gites métallifères qui accompagnent la minéralisation aurifère ;
- les ETM et les éléments majeurs issus des activités anthropiques polluent le sol et les eaux de la commune de Natitingou et des zones environnantes ;
- les activités agricoles et d'orpaillage contribuent à une dégradation physique et chimique de l'environnement de la commune de Natitingou et des zones environnantes.

L'objectif général de ce travail est d'utiliser les bases de connaissances scientifiques et techniques requises pour évaluer la qualité chimique des eaux, des sols et de l'environnement de la Commune de Natitingou, en liaison avec les activités anthropiques qui s'y mènent.

De façon spécifique, ce travail vise à :

- faire le point des connaissances antérieures relatives à la qualité chimique des eaux et des sols du secteur d'étude et des activités qui s'y mènent.
- inventorier les sites de pollution potentielle des eaux et des sols.
- apprécier la qualité chimique des eaux de la commune de Natitingou.

Ce mémoire comporte quatre (4) chapitres. Le chapitre 1, présente la synthèse bibliographique sur les sols, les eaux et les éléments traces métalliques (ETM). Le chapitre 2, est consacré à la présentation du milieu d'étude. Le chapitre 3, ensuite présente la méthodologie adoptée pour la réalisation du présent travail. Enfin, les résultats et discussions sont présentés dans le chapitre 4 qui est suivi d'une conclusion et de quelques perspectives.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SOLS, LES EAUX ET LES ETM

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SOLS, LES EAUX ET LES ELEMENTS TRACES METALLIQUES (ETM)

1- Définitions et clarifications de certains concepts

1.1- Le sol

Le mot sol désigne des réalités assez différentes selon le point de vue sous lequel on se place. Pour le spécialiste en pédologie, le sol est une entité parfaitement définie et complètement caractérisée aux plans morphologique, hydrique, minéralogique et biologique. Le géologue, lui, définira le sol comme étant tout ce qui recouvre la roche-mère, objet principal de ses investigations. Enfin, il existe aussi une approche fonctionnelle qui décrit le sol à partir des interactions entre ses différents constituants, qu'ils soient inertes (eau, air, minéraux...) ou qu'il s'agisse d'êtres vivants, végétaux ou animaux (Sirven, 2006).

Chacune de ces définitions fournit des éléments pertinents. En guise de synthèse, dans ce paragraphe, le sol désignera la couche de matériau plus ou moins meuble, issue de l'altération de la roche-mère au cours du temps, constituant la partie supérieure de la croûte terrestre, matériau hétérogène composé d'éléments vivants et non vivants en interactions complexes. Un sol a une épaisseur de l'ordre de quelques décimètres à quelques mètres, négligeable devant celle de la lithosphère (≈ 100 km).

Plus précisément, le sol est décrit comme une superposition et une juxtaposition d'horizons. Un horizon est une « couche » de sol, c'est-à-dire un volume considéré comme homogène dont la dimension verticale est variable du centimètre au mètre. Les horizons sont généralement visibles à l'œil nu sur des coupes transversales de sol, leurs caractéristiques physico-chimiques, morphologiques et biologiques peuvent varier fortement entre deux horizons voisins.

1.2- Qualité physico-chimique des eaux

D'après Louis Jean (2009) les qualités physico- chimiques se réfèrent aux caractéristiques physiques, biologiques et à la teneur en matière minérale de l'eau. Selon le même auteur, certains auteurs déterminent les qualités de l'eau en tenant compte de la nature du sol, du climat local, des types de culture de méthodes d'irrigation, des conditions locales de drainage. Cependant dans la pratique on considère uniquement certains paramètres physiques

et minéraux dont la connaissance renseigne significativement sur les qualités physico-chimiques des eaux étudiées. C'est cette approche pratique qui a guidé notre travail.

1.2.1- Principaux paramètres physico-chimiques de l'eau et des sols autres que les ETM

1.2.1.1- Le pH

Le pH d'une eau représente son acidité ou son alcalinité.

Lorsque le pH est supérieur à 8 il y a diminution progressive de l'efficacité de la décontamination microbienne par le chlore.

Le pH agit indirectement sur la santé dans la mesure même où il influe sur les différents procédés du traitement destiné à éliminer les virus, les bactéries et autres organismes nocifs.

L'O.M.S préconise pour l'eau destinée à la consommation humaine un pH compris entre 6,5 et 8,5 (.Samake, 2002).

1.2.1.2- La température

L'O.M.S ne donne pas de valeur guide concernant la valeur de la température.

Pratiquement la température s'accompagne d'une modification de la densité, d'une réduction de la viscosité, d'une augmentation de la tension de vapeur saturante à la surface, d'une diminution de la solubilité des gaz.

L'augmentation de la température favorise aussi l'autoépuration et accroît la vitesse de sédimentation, ce qui peut présenter un intérêt dans les stations d'épuration. Elle peut favoriser la mortalité de certaines espèces et le développement d'autres. (.Samake, 2002)

1.2.1.3- La conductivité

La conductivité de l'eau est une mesure de sa capacité à conduire le courant électrique. La mesure de la conductivité permet d'apprécier rapidement mais très approximativement la minéralisation de l'eau et d'en suivre l'évolution. Une conductivité électrique de l'eau supérieure à 1500 µS/cm fait considérer une eau comme inutilisable dans les zones irriguées (.Samake, 2002) .

Tableau I : Relation entre minéralisation et conductivité selon la réglementation française.

0 – 100	µS/cm Minéralisation très faible
100 – 200	µS/cm Minéralisation faible
200 – 333	µS/cm Minéralisation moyenne accentuée
333 – 666	µS/cm Minéralisation accentuée
666 – 1000	µS/cm Minéralisation importante
> 1000	µS/cm Minéralisation élevée

1.2.1.4- La dureté de l'eau

La dureté de l'eau est due à la présence de calcium et dans une moindre mesure, de magnésium. On l'exprime généralement en quantité équivalente de carbonate de calcium.

Tableau II : Relation entre dureté de l'eau et concentration équivalente en $CaCO_3$.

Durété de l'eau	Concentration en mg/l
Eau douce	0 à 60 mg/L
Eau moyennement douce	60 à 120 mg/L
Eau dure	120 à 180 mg/L
Eau très dure	plus de 180 mg/L

Une dureté supérieure 200 mg/L peut provoquer l'entartrage du système de distribution et entraîner une consommation excessive de savon avec formation d'écume (.Samake, 2002).
Selon le même auteur, la concentration du calcium dans l'eau de consommation n'est pas généralement élevée par rapport au besoin journalier de l'Homme (2 g/j).

1.2.1.5- Les nitrates

Les nitrates sont présents dans l'eau par lessivage des produits azotés dans le sol, par décomposition des matières organiques ou, des engrais de synthèse ou naturels.
Les nitrates proviennent également de l'oxydation de l'ammoniaque.
Le taux autorisé est de 50 mg/L en NO_3^- ou 10 mg/L en N (.Samake, 2002).

1.2.1.6- Les nitrites

Ils sont également assez largement présents, mais à des niveaux bien moindres que les nitrates.

Les nitrites proviennent d'une oxydation incomplète des matières organiques.

Comme les nitrates, les nitrites sont très répandus dans l'environnement, les uns et les autres se retrouvent dans la plupart des produits alimentaires, dans l'atmosphère et dans une grande partie des eaux.

Les nitrites peuvent provoquer dans certains cas des phénomènes de méthémoglobinisation pouvant aller parfois jusqu'à l'asphyxie chez les bébés (.Samake, 2002).

1.2.1.7- Les phosphates

L'absorption quotidienne recommandée de phosphate va de 240 mg pour les nourrissons à 120 mg pour les femmes qui allaitent.

Les eaux naturelles n'en contiennent pratiquement pas.

Ils proviennent des pollutions :

- fécales 1 à 2 gramme/personne/jour
- agricoles par lessivage des engrais phosphatés.

Les phosphates présents dans l'eau peuvent occasionner des troubles digestifs à cause de leur effet tampon. Ils sont souvent responsables de l'eutrophisation des plans d'eau de surface. Le taux limite est de 5 mg/L en P_2O_5 (.Samake, 2002).

1.2.1.8- Les sulfates

Ils proviennent principalement des gypses présents dans le sol.

Comme les sulfates ne sont pratiquement pas assimilables, une eau contenant une teneur élevée produira des effets laxatifs chez l'homme.

Ils pénètrent lentement dans les membranes cellulaires et sont rapidement éliminés par les reins.

Le taux maximum est de 250 mg/L d'eau.

Les concentrations élevées de sulfates peuvent contribuer à la corrosion des systèmes de distribution, surtout avec des eaux faiblement alcalines (Samake, 2002).

1.3- Les métaux lourds ou ETM

1.3.1- Définition et origine des ETM

On emploie généralement le terme de métaux lourds pour désigner les Eléments Traces Métalliques. Bien que le terme « métaux lourds » soit abondamment utilisé, et ce

même dans la littérature scientifique, il n'a pas de réelle définition scientifique ou juridique

unanimement reconnue. Dans un article intitulé *"Heavy metals"-a meaningless term?* (« Métaux lourds » - un terme sans signification ?), cité par Deschamps et *al* (2006), Duffus (2002) recense les diverses utilisations du terme métal lourd : certains auteurs définissent les métaux lourds selon leur densité minimum (de 3,5 à 6 g/cm^3) ; d'autres en fonction de leur masse atomique ou de leur numéro atomique. Le terme métal lourd impliquant une notion de toxicité, il est souvent utilisé pour l'arsenic (métalloïde) ou le sélénium (non-métal). Parmi les éléments les plus couramment désignés par le terme métal lourd on retrouve : le vanadium, le chrome, le cobalt, le nickel, le cuivre, le zinc, l'arsenic, le sélénium, le plomb, le cadmium, le mercure, etc. Le terme « éléments traces » est aussi souvent utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans les solides et les eaux. Dans ce texte, nous utiliserons indifféremment les termes "métaux lourds" ou "élément traces métalliques" (ETM). Les éléments en traces métalliques (ETM) sont les 80 (BRGM, 2006) éléments constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est inférieure à 0.1 %. Les ETM peuvent être des métaux (Pb, Zn, Cu etc…), des métalloïdes (As, B, Se) ou des non métaux (N, F, Cl, Br) (Baize, 1997). Dans les études environnementales, le terme est souvent associé au qualificatif de toxique, en omettant de signaler qu'en faibles concentrations, certains ETM sont des nutriments indispensables pour le vivant.

Les ETM sont naturellement présents dans les sols en faibles quantités. Selon Fernandez-Cornudet, 2006, « ils sont en partie libérés lors de l'altération de la roche mère et constituent le pool endogène appelé fond pédogéochimique : concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique (Baize, 1997). Un second pool, plus ou moins important selon la situation géographique, issu d'apports exogènes, provient essentiellement de l'activité humaine (Dère, 2006).

- de façon diffuse, émis par l'activité industrielle, les moyens de transport et amené par voie atmosphérique, ou
- Localement, soit de façon ponctuelle par l'apport de déchets contaminés, soit de façon répétée et cumulative par l'activité agricole (Godin et al., 1985) »

1.3.2- Solubilité des ETM dans l'eau

Il a été montré que la solubilité des ETM dans les systèmes aquatiques est contrôlée par une compétition entre les réactions d'insolubilisation (précipitation et adsorption) et de

solubilisation (formation de complexes dissous). Comme la plupart des solides et complexants naturels sont des acides faibles, l'adsorption et la complexion (en phase aqueuse) dépendent du pH (Bourg, 1983).

Selon Lions (2004), cité par Deschamps et al. (2006), le pH joue un rôle très important dans la mobilité des métaux. Un pH acide entraîne la mise en solution des sels métalliques, la mise en solution des phases de rétention, la désorption des cations et l'adsorption des anions. La solubilité diminue donc lorsque le pH augmente, passe par un minimum, puis augmente quand l'élément se retrouve sous forme anionique. Certains métaux sont plus ou moins mobiles selon leur état d'oxydo-réduction. Par exemple, le chrome est considéré comme toxique et mobile sous sa forme Cr (VI), mais pas sous sa forme Cr (III).

1.3.3- Distributions spatiales des ETM

La distribution spatiale des ETM est déterminée par leur répartition dans la nature. Selon le dictionnaire Larousse, la distribution d'un fluide, est l'action de conduire, de transporter ce fluide en divers lieux. La distribution des ETM intervient par l'intermédiaire d'un fluide. Il s'agit donc de leur mobilité dans les divers compartiments du milieu naturel.

Selon Sirven (2006), la mobilité d'un élément caractérise son aptitude à passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie à un autre, où il est retenu avec une moindre énergie. Plus une substance se déplace dans le sol, plus elle sera susceptible d'être absorbée par un organisme vivant.

Lorsque des contaminants se déposent sur un sol, ils se dissolvent partiellement et progressivement dans l'eau de pluie qui les transporte verticalement à travers le sol, puis le sous-sol, lors de son processus d'infiltration. D'après (Lassabatere, 2002), le transport des métaux lourds résulte du transport par phase liquide (transport aqueux), du transport par la fraction solide mobile (transport particulaire) ainsi que des échanges entre la phase liquide et la phase solide. Ainsi, selon Pili et *al*, 2009, « Après avoir traversé la zone non saturée, ces éléments ou ces composés chimiques peuvent ainsi parvenir jusqu'à la nappe d'eau souterraine, à plusieurs mètres ou plusieurs dizaines de mètres sous la surface du sol. Là, ces différentes substances se trouvent une nouvelle fois diluées puis transportées subhorizontalement selon l'écoulement général des eaux souterraines dans la nappe. Celle-ci a pour exutoires naturels les rivières et autres plans d'eau superficiels, quand elle n'est pas prélevée à l'aide de puits ou forages pour des usages d'alimentation en eau potable,

domestique, agricole ou industrielle ». Par la biodisponibilité, qui est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment quelconque du sol dans un être vivant, (bactérie, végétal, animal ou homme), le plus souvent via la solution du sol (Sirven, 2006), les ETM parviennent aux plantes, aux animaux et aux Hommes.

Les éléments traces sont aussi présents dans l'air (atmosphère) et peuvent se présenter sous deux formes : soit sous forme gazeuse pour certains composés métalliques dont la pression de vapeur saturante est élevée (cas du mercure à température ambiante), soit sous forme de composés métalliques solides déposés sur les très fines particules ou poussières formées lors des phénomènes de combustion. C'est le cas du plomb sur les particules formées dans les moteurs à explosion et le cas de tous les métaux sur les particules formées dans les incinérateurs d'ordures ménagères (Guédénon, 2009).

1.3.4- Comportement des ETM dans les sols

Le comportement des ETM, dans les sols dépend fortement de la nature et de la proportion des différents composants de ce sol. Selon Deschamps et al 2006, "les principaux composants du sol pouvant influencer la rétention des métaux sont décrits ci-après: les argiles sont des silicates, en général d'aluminium, plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (phyllosilicates), ou bien fibreuse (comme la sépiolite ou la palygorskite). Les interstices entre les feuillets peuvent contenir des molécules d'eau ou des ions. Les minéraux argileux possèdent de grandes surfaces spécifiques (jusqu'à 800 m^2/g) et de grandes capacités d'échange cationique. Les argiles peuvent donc retenir une importante quantité de métaux lourds par adsorption. Quant aux carbonates, leur dissolution joue un rôle important dans le contrôle du pH du sol. Une forte teneur en carbonate relève le pH du sol. Les carbonates peuvent incorporer des cations métalliques dans leur maille cristalline (Bourg, 1988). Selon le même auteur, La silice est abondamment présente dans les sols sous forme cristalline ou amorphe. Des groupements hydroxyles de surface se forment par hydratation, cela permet l'adsorption de cations métalliques.. Étant de bons adsorbants, les différents

oxydes et hydroxydes métalliques présents dans les sols (fer, aluminium, manganèse, etc.) jouent aussi un rôle important dans la rétention des ions métalliques. La quantité d'ions ainsi adsorbés reste fortement dépendante du pH du milieu. Les principaux oxydes de fer présents dans les sols sont : l'hématite, la maghémite, la goéthite, la lépidocrocite et la ferrihydrite (Blanchard, 2000). Le principal oxyde d'aluminium présent dans les sols est la gibbsite ; les

autres sont la bohémite et la nordstrandite. Bien que plus rares, les oxydes de manganèse jouent un rôle important, car ils possèdent une affinité particulière pour certains métaux lourds (Cu, Zn, Ni, Pb…) qu'ils peuvent adsorber en grande quantité (Blanchard, 2000)". La silice par contre sous sa forme cristalline, possède une faible surface qui limite fortement son rôle dans les capacités de rétention des métaux du sol

1.3.5- Comportement des ETM en zone minière

Les pollutions au niveau des zones minières sont très caractéristiques. Les différents déchets industriels, les résidus de concentrateur minier et les stériles miniers peuvent constituer une source importante de pollution aux métaux lourds, du fait du phénomène de drainage minier acide (DMA). Ce drainage peut être matérialisé par les réactions suivantes (Aubertin et al., 2002) :

Minéral sulfureux + O_2 + H_2O → sulfate + acidité + métaux (eq.1)

Minéral sulfureux + Fe^{3+} + H_2O → sulfate + acidité + métaux (eq.2)

Carbonate + acidité → sulfate + H_2O + CO_2 (eq.3)

Le DMA se déclenche quand des minéraux sulfureux sont exposés à l'eau et à l'air. L'oxydation libère alors de l'acidité dans le milieu, favorisant ainsi la mise en solution des métaux lourds. L'oxydation peut être directe (eq.1), ou indirecte (eq.2) quand le pH est inférieur à 3. Les carbonates se dissolvent pour neutraliser l'acidité produite (eq.3). Une fois le potentiel de neutralisation épuisé, le milieu s'acidifie et le DMA s'amplifie **(**Deschamps **et** *al,* **2006).**

1.4- Spécificités de la pollution des sols et des eaux par quelques principaux métaux lourds

Selon Sirven (2006), les métaux lourds, comparés aux polluants organiques, comme les hydrocarbures par exemple, ont l'inconvénient majeur de n'être pas dégradables par des processus chimiques ou biologiques dans le sol. On parle de persistance des métaux. Ils ne sont susceptibles que de changer de forme chimique, dont la répartition dans le sol est désignée sous le nom de spéciation, et de passer d'un compartiment du sol à un autre au gré de ces transformations. S'ils ne sont pas présents à l'état métallique, ils peuvent se fixer aux argiles ou aux matières organiques par liaison ionique, ou bien former des complexes en

solution, ou des composés inorganiques, ou encore se fixer à la surface de particules par adsorption. Les métaux lourds concernés par cette étude sont l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb. Ces métaux ont été choisis à cause de leur toxicité élevée. En effet, l'une des particularités de ces éléments est d'entraîner des effets majeurs sur la santé humaine (caractère toxique des substances) et/ou sur les écosystèmes (caractère écotoxique des substances) en cas d'exposition (Gouzy, 2008). Le tableau III montre bien le caractère dangereux de ces éléments par rapport à d'autres métaux lourds

1.4.1- L'arsenic

Ce n'est pas un métal lourd, mais il sera classé dans cette rubrique à titre de contamination organique et parce qu'il est souvent associé à des métaux lourds.

De nombreuses études récentes montrent que cet élément pose des problèmes sanitaires dans les régions arides (Pakistan, Sud des USA, Mexique, et de nombreuses autres régions du globe.). Cet élément est naturellement présent dans des minéraux tels que les arsénopyrites dont l'altération oxyde les arséniures insolubles en arséniates solubles dans l'eau. Le comportement de l'arsenic ressemble à celui du soufre (sulfure insoluble oxydé en sulfure soluble).

Les arséniates solubles migrent avec l'eau. Si le climat est aride, les eaux se concentrent (minéralisation) et la teneur en arsenic dissous augmente jusqu'à des niveaux dangereux.

Dans les régions d'extraction de minerais (sulfures) associées à des minéralisations d'origine profonde ou à du volcanisme, il faudra suspecter des teneurs naturellement élevées en arsenic.

Accessoirement, des contaminations plus locales sont liées à un usage de produits de traitement du bois. Au niveau sanitaire, l'arsenic provoque notamment des cancers cutanés.

Il augmente la fréquence de ces maladies. Il présente un effet cumulatif.

En conditions oxydantes, l'arsenic est soluble sous deux niveaux d'oxydations. Il s'agit de la forme pentavalente, prédominante en conditions très oxydantes. Lorsque les conditions sont moins oxydantes, la forme majoritaire est la trivalente, nettement plus toxique. Les formes trivalentes et pentavalentes étant solubles, elles peuvent atteindre de fortes concentrations sans être affectées par des processus de précipitation de minéraux.

Heureusement, ces formes sont susceptibles de s'adsorber à la surface de minéraux tels que les oxydes métalliques, en particulier les oxydes de fer.

1.4.2- Le mercure

Les caractéristiques du mercure peuvent être résumées comme suit :

Il constitue le seul métal liquide à température ambiante et dont la température d'ébullition est inférieure à 650°. Il se divise par l'agitation en fines gouttelettes caractérisé par une extrême volatilité. Il se combine très facilement avec d'autres molécules, que ce soient des métaux (amalgames), des molécules inorganiques (sels) ou organiques (carbone).

C'est un métal dit « lourd » dans la classification du chimiste Mendeleiev, dans la mesure où il possède une « masse atomique » de 200 g/mol (hydrogène =1). Il est réputé être un métal toxique. Une toxicité qui vient à la fois de son extrême volatilité (puisqu'il peut être facilement respiré), de sa relative solubilité dans l'eau et les graisses (il peut être facilement transporté dans le corps), et de sa capacité à se lier avec d'autres molécules qu'il va modifier ou dont il va transformer les fonctions.

Sur le plan physico-chimique, le mercure est un métal qui change facilement de forme et de propriétés. Très volatil, il passe aisément de l'état liquide à l'état gazeux à température ambiante. En présence d'oxygène, le mercure s'oxyde très facilement passant de l'état métallique (Hg^0), liquide ou gazeux, à l'état ionisé (Hg^{2+}). C'est aussi un métal qui s'associe facilement aux molécules organiques pour former de nombreux dérivés mercuriels.

Le mercure se présente sous forme de deux familles distinctes :

- **Le mercure métallique ou inorganique** qui prend lui-même trois formes différentes :
  - le mercure métallique élémentaire, sous forme **liquide** (noté Hg°). C'est le mercure classique, sous sa forme la plus connue, qui était utilisé dans les thermomètres ;
  - le mercure sous forme **gazeuse** (noté Hg°). Le mercure, en chauffant, se transforme en vapeur ;
  - le mercure inorganique, sous forme **ionique**. C'est ce qu'on appelle les atomes de mercure (notés Hg^{2+})
- **Le mercure organique**, issu de la combinaison avec une molécule contenant du carbone, celui-ci étant à la base de tout élément vivant ou qui l'a été. Il existe des échanges permanents entre ces différentes formes, car le mercure a une grande capacité à se transformer, notamment sous l'effet de l'acidité du milieu, et de la présence de molécules assurant ces combinaisons (chlore, soufre). La transformation peut être décrite comme suit :

- *du mercure métallique aux ions mercuriques, l'oxydation* ; le mercure sous forme de vapeurs est inhalé ; par l'action de la catalase présente dans les globules rouges, le mercure métallique est transformé en ions mercuriques, qui passent dans le sang ;
- *des ions mercuriques au mercure organique, la méthylation* : la méthylation se déroule principalement en milieu aqueux ou dans les intestins, en fonction de l'acidité et de la présence de soufre. Les composés de mercure organique les plus connus sont le méthylmercure et le diméthylmercure.

1.4.3-Le Plomb

Très utilisé dans le passé récent comme additif dans les produits pétroliers, comme les essences, ou bien pour les tuyauteries ou encore les peintures. Les sols du voisinage autoroutier ou du réseau routier sont contaminés. L'essentiel du plomb rejeté dans l'atmosphère par les gaz d'échappement parcourt une courte distance. Le plomb migre à faible distance dans l'air (Miquel, 2001).

Cet élément n'est pas affecté pas les processus redox, mais selon les conditions de pH et de potentiel redox (Eh), il peut subir différents mécanismes de contrôle de sa solubilité. En milieu réducteur, sa solubilité est limitée par la précipitation du sulfure de plomb (la galène). En conditions oxydantes, le plomb est nettement plus soluble et précipite sous forme de sulfate de plomb (anglésite) ou de carbonate de plomb (cérusite) en milieu carbonaté. Avec les ions carbonates, il forme des complexes, ce qui augmente sa solubilité aux pH élevés.

La précipitation de plomb sous forme de cérusite peut dans certaines conditions de pH et de pression partielle en CO_2 maintenir la teneur en plomb à des niveaux très bas. En revanche, ce n'est pas le cas de l'anglésite (sulfate de plomb) dont la solubilité est telle, que même avec précipitation jusqu'à l'équilibre théorique avec ce minéral, les teneurs en plomb dissous demeurent élevées.

Enfin, le plomb présente une affinité avec les matières organiques, notamment de poids moléculaire moyen, pour former des complexes organométalliques qui peuvent présenter une grande toxicité et faciliter leur mobilité.

De manière générale, le plomb sera plus soluble en conditions acides qu'avec des eaux incrustantes où le danger sera moindre.

Comme pathologies, chez l'adulte, le saturnisme désigne l'ensemble des manifestations de l'intoxication par le plomb. Les coliques de plomb sont les effets toxiques les plus connus mais ses principaux organes cibles sont : le système nerveux, les reins et le sang.

- Sur le système nerveux, le plomb est responsable d'atteintes neurologiques. En cas d'intoxications massives, l'effet neurotoxique du plomb peut se traduire par une encéphalopathie convulsivante pouvant aller jusqu'au décès. En cas d'intoxication moins sévère, on a observé des troubles neuro-comportementaux et une détérioration intellectuelle.
- sur la moelle osseuse et le sang, Le plomb bloque plusieurs enzymes nécessaires à la synthèse de l'hémoglobine. Ces effets sanguins aboutissent à une diminution du nombre des globules rouges et à une anémie (Miquel, 2001).

Chez les enfants de 1 à 3 ans, le risque d'intoxication saturnique est plus élevé. Le système nerveux central des enfants est particulièrement sensible à l'action toxique du plomb. Une encéphalopathie aiguë convulsivante apparaît généralement lorsque la plombémie est de l'ordre de 1.000 µg/l. Elle n'a jamais été observée lorsque la concentration sanguine de plomb est inférieure à 700 µg/l. Chez les enfants dont la plombémie est comprise entre 500 et 700 µg/l, des troubles neurologiques moins sévères sont souvent observés : diminution de l'activité motrice, irritabilité, troubles du sommeil, modifications du comportement, stagnation du développement intellectuel (Miquel, 2001).

1.4.4- Le cadmium

Le cadmium est un métal qui se présente dans la nature avec le degré d'oxydation +2 dans toutes les combinaisons. Ces propriétés chimiques sont analogues à celles du zinc et on le rencontre dans les minerais sous forme de sulfures, en compagnie du zinc (Zn) et du plomb (Pb) : la blende ou sphalérite (ZnS) et la smithsonite ($ZnCO_3$). Le cadmium présente une bonne malléabilité et s'étire en fil dans les conditions normales devenant cassant dès 80°C (Petrov *et al*, 1984). La proportion ce cadmium dans l'écorce terrestre est 1,5 $.10^{-5}$ % massiques.

Les engrais produits à partir de minerais phosphatés constituent l'une des principales sources diffuses de pollution par le cadmium. La solubilité du cadmium dans l'eau dépend beaucoup de l'acidité ; le cadmium en suspension ou lié aux sédiments peut se dissoudre si l'acidité augmente. Dans les eaux naturelles, le cadmium se rencontre principalement dans les dépôts

de sédiments et les particules en suspension (OMS, 2000).

Les divers composés du cadmium présentent des effets toxiques variables selon leur solubilité, et donc leur facilité d'assimilation par l'organisme. Ainsi, le chlorure de cadmium, soluble, apparaît plus toxique que le sulfure de cadmium très insoluble.

Une exposition de courte durée à de fortes concentrations de poussières ou de fumées, de composés de cadmium est irritante pour les cellules des systèmes respiratoires et gastro-intestinaux. La principale préoccupation vis-à-vis du cadmium correspond aux possibilités d'expositions prolongées et à de faibles doses. Les principales causes d'exposition au cadmium sont l'alimentation et le tabagisme. 12 milligrammes de cadmium sont ingérés annuellement en moyenne par nos concitoyens. L'essentiel du cadmium ingéré provient de végétaux à feuillage vert, salades, choux, épinards et dans une moindre mesure des

12 céréales. La principale voie d'élimination du cadmium est l'urine, mais cette élimination est très lente (Miquel, 2001).

L'accumulation du cadmium s'effectuant principalement dans les reins, cet organe est considéré de ce fait, comme un organe " cible ".

Le risque de **cancérogénicité** des sels de cadmium se présente comme suit :

des enquêtes épidémiologiques récentes ne confirment pas les observations qui ont pu être faites antérieurement montrant un excès de cancers de la prostate chez les travailleurs exposés aux composés de cadmium. En conséquence, les experts estiment maintenant que le cadmium ne doit pas être considéré comme un agent cancérogène pour la prostate. Dans plusieurs enquêtes épidémiologiques en milieu professionnel, on relève des indications d'un possible excès de cancers du poumon. Toutefois ces enquêtes ne permettent pas de séparer les effets éventuels du cadmium de ceux d'autres facteurs appelés "facteurs de confusion", tels que le tabagisme, la pollution atmosphérique et l'exposition professionnelle à d'autres substances toxiques. Cependant, le Comité mis en place par la Commission des Communautés européennes a décidé de classer le sulfate et l'oxyde de cadmium comme cancérogènes "probables" par inhalation pour l'homme et le sulfure de cadmium comme cancérogène "possible" pour l'homme (Miquel, 2001).

Selon le même auteur, la préoccupation essentielle concerne, pour le futur, les effets sur **le rein** d'une accumulation dans l'organisme du cadmium absorbé via les aliments et le tabac.

Les sels de cadmium, très peu volatils, sont présents dans l'air sous forme de très fines particules solides (fumées ou poussières). Lors d'expositions professionnelles, ces particules

peuvent être inhalées et se déposer principalement dans les alvéoles pulmonaires. La taille de ces particules a donc une grande importance pour déterminer leur absorption.

Parmi les expositions professionnelles aux sels de cadmium, on peut noter la métallurgie du zinc, la production de pigments et la fabrication d'accumulateurs, le décapage de peintures...

Des accidents peuvent cependant survenir lors de la production ou de la mise en œuvre du cadmium ou de ses composés :

- par voie digestive : l'absorption d'une faible quantité de ces substances est suivie de troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissements, diarrhée). Ces troubles peuvent, dans les cas sévères, se compliquer d'une déshydratation grave de l'organisme ;

- par voie respiratoire : l'inhalation de fumées ou de poussières respirables (d'un diamètre inférieur à 5 microns) à des concentrations supérieures à 200 microgrammes par m^3 et de façon plus ou moins prolongée peut provoquer rapidement un trouble pulmonaire grave.

Il ne semble pas y avoir de relation proportionnelle entre le niveau d'exposition par inhalation au cadmium et son absorption par l'organisme : celle-ci dépend essentiellement des dimensions et de la forme des particules de poussières (Miquel, 2001).

Tableau III : Effets majeurs toxiques et écotoxiques des éléments traces métalliques (Sparks, 1998).

ÉLÉMENT TRACE MÉTALLIQUE	EFFET(S)
As	**Toxique, possible cancérigène**
Cd	**Hypertension, dommages sur le foie**
Cr	Cancérigène sous forme de Cr(VI)
Cu	Peu toxique envers les animaux, écotoxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés
Hg	**Toxicité chronique et aiguë**
Ni	Allergies de peau, maladies respiratoires, possible cancérigène
Pb	**Toxique**
Se	Essentiel à faibles doses, Toxique à doses élevées
Zn	Ecotoxique pour les végétaux à de fortes teneurs

1.4.5- Conclusion

Ce chapitre a permis de cerner plus ou moins le problème que pose notre sujet d'étude et d'avoir des informations sur les travaux déjà effectués dans le domaine de la pollution des sols et des eaux. A cet effet, nous avons collecté les informations sur, d'une part, les deux entités physiques que sont le sol et l'eau et d'autre part, sur les différents éléments qui permettent d'apprécier leur qualité à savoir, les paramètres physicochimiques et les éléments traces métalliques. Ainsi, certains auteurs déterminent les qualités de l'eau en tenant compte de la nature du sol, du climat local, des types de culture de méthodes d'irrigation, des conditions locales de drainage. La connaissance de certains paramètres physiques et minéraux renseigne significativement sur les qualités physico- chimiques des eaux étudiées. Ces paramètres sont le pH, la température, la conductivité, la dureté de l'eau, les nitrates, les nitrites, les phosphates, les sulfates, le sodium, le magnésium, le calcium etc. Quant aux métaux lourds ou ETM, ils sont définis soit en tenant compte de leur densité minimum, soit en

fonction de leur masse atomique ou numéro atomique. Ils sont naturellement présents dans les sols en faibles quantités. Leur solubilité dans les systèmes aquatiques est contrôlée par une compétition entre les réactions d'insolubilisation (précipitation et adsorption) et de solubilisation (formation de complexes dissous). La distribution spatiale des ETM intervient par l'intermédiaire d'un fluide et est déterminée par leur répartition dans la nature. Le comportement des ETM, dans les sols est fortement influencé par la nature et la proportion des différents composants de ceux-ci. Les pollutions au niveau des zones minières sont très caractéristiques. Les différents déchets industriels, les résidus de concentrateur minier et les résidus stériles du minerai peuvent constituer une source importante de pollution aux métaux lourds, du fait du phénomène de drainage minier acide (DMA). Les métaux lourds, comparés aux polluants organiques, comme les hydrocarbures (produits pétroliers) par exemple, ont l'inconvénient majeur de n'être pas dégradables par des processus chimiques ou biologiques dans le sol. Les métaux concernés pour la suite de ce travail sont l'arsenic, le mercure, le Plomb, le cadmium.

CHAPITRE II

MILIEU D'ETUDE

2.1- Localisation du cadre de l'étude

Située au centre du département de l'Atacora dans le Nord-Ouest du Bénin, la Commune de Natitingou se trouve entre les méridiens 1°12'11''et 1°36'43'' de longitude est et les parallèles 10°00'00'' et 10°27'36'' de latitude nord. Elle s'allonge dans une sorte de vallée formée par les deux bourrelets de montagnes de quartzites qui l'entourent. Le point culminant de cette montagne avoisine les 650 m dans la Commune. Le chef lieu de la commune, Natitingou, est situé à 645km de Cotonou, capitale économique du Bénin et à 100km de Porga dans la commune de Tanguiéta, à l'entrée du Parc National Zoologique de la Pendjari. D'une superficie de 1.339 km², la Commune de Natitingou est limitée au Nord par la Commune de Toucountouna, à l'Ouest par la Commune de Boukoumbé, au Sud et à l'Est par la Commune de Kouandé (***Fig. 1***). Elle compte neuf (09) arrondissements qui sont : Natitingou I, Natitingou II, Natitingou III, Pèporiyakou, Kotopounga, Kouandata, Perma, Tchoumi-Tchoumi et Kouaba.

2.2- Répartition temporelle des saisons

Les travaux antérieurs ont montré qu'au niveau du territoire béninois, que les déplacements du FIT dans les basses couches de l'atmosphère (zone de confluence entre les flux du secteur nord et nord-est et les flux du secteur sud et sud-ouest) sont à peu près identiques chaque année (Le Barbé et *al*., 1993).

A partir de janvier, cette zone remonte progressivement vers le Nord et atteint les limites septentrionales du pays en mars. Lors de sa descente, elle atteint le Nord du pays en octobre et le Sud en décembre, si bien qu'il existe, sur le plan climatique, un clivage entre la zone côtière et le Nord du territoire, même si le passage entre ces deux zones climatiques est progressif. En effet, du Sud au Nord on passe graduellement d'une zone qui reste presque toute l'année sous l'influence des alizés océaniques avec des amplitudes thermiques très modérées et des précipitations qui suivent un régime à deux saisons de pluie, séparées par une courte saison sèche à deux mois, à une zone qui reste presque toute l'année sous l'influence de l'harmattan sec. Cette dernière zone se caractérise par une augmentation des écarts thermiques d'une part, une disparition de la petite saison sèche d'autre part. L'unique saison sèche de l'année est alors plus étalée dans le temps (six mois, d'octobre à mars).

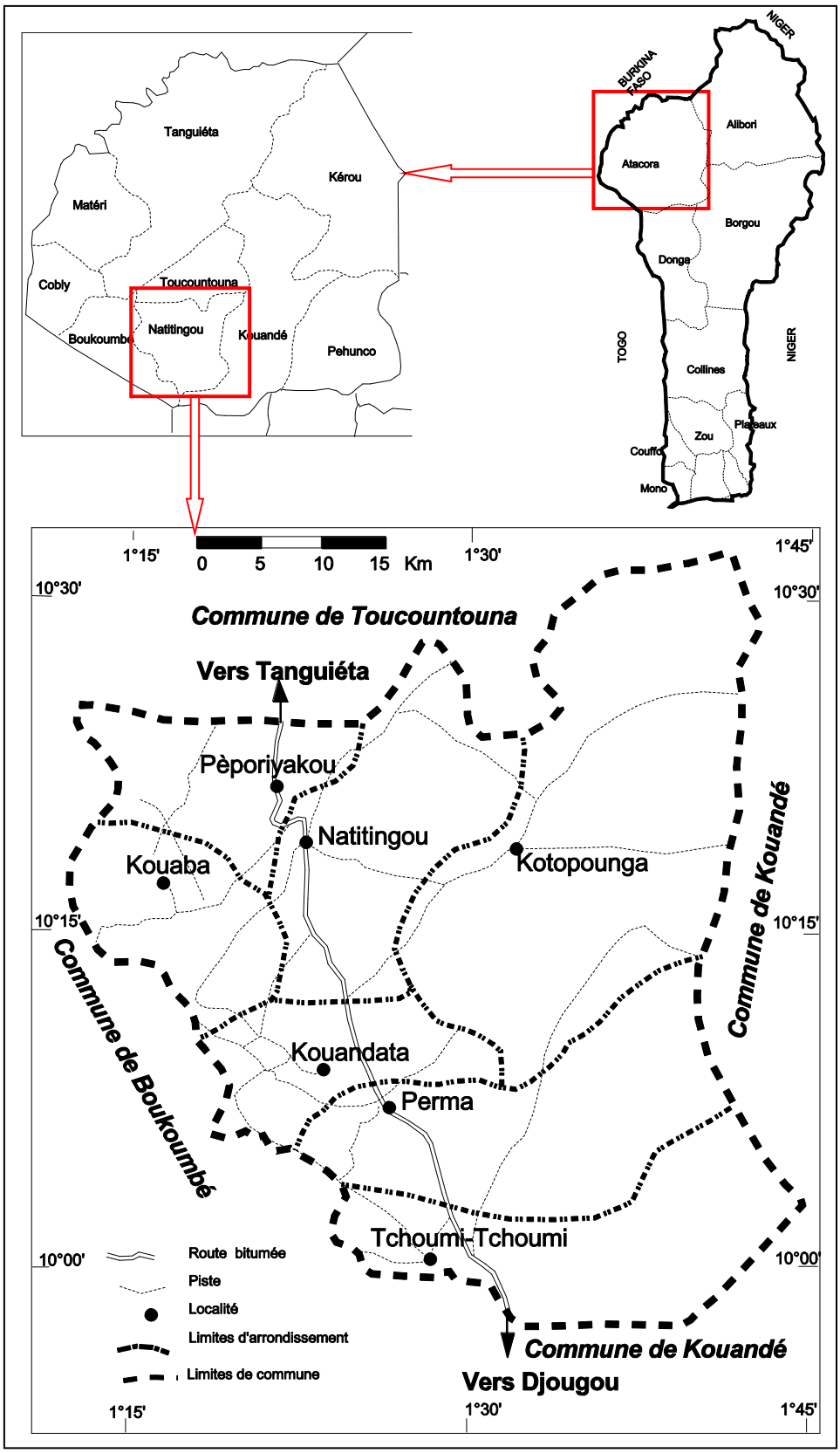

Fig.1- Situation géographique de la commune de Natitingou

Des nuances locales apparaissent cependant à l'intérieur de chaque domaine. Elles sont liées à la position géographique ou au relief et s'observent au niveau de la distribution de certains paramètres climatiques comme les précipitations et la température.

La Commune de Natitingou est en effet, sous un climat de type soudano-guinéen caractérisé par deux saisons : une saison pluvieuse, de mai à octobre et une saison sèche, de novembre à avril (Tableau IV).

Tableau IV: Moyennes mensuelles des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle à la station de Natitingou de 1979 à 2008.

Mois / Paramètres	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
Précipitations (mm)	1,8	2,7	20,4	73,5	125,4	145,5	189,7	272	239,3	90,2	11	1,9	1173,4
ETP (mm)	127,3	129	153,1	148,5	140,2	120	108	103,6	106,2	118,7	119	120,8	1494,4

Source : Données de l'ASECNA, période de 1979 à 2008.

Les précipitations moyennes annuelles calculées pour la période de 1979 à 2008 sont de 1173.4 mm ce qui montre que la Commune est bien arrosée avec des maxima qui culminent jusqu'à 1400 mm d'eau par an. Les hauteurs de pluies sont surtout élevées dans les mois de juillet, août et septembre avec des valeurs moyennes respectives de 189.7 mm, 272 mm et 239.3 mm contre respectivement 108 mm, 103.6 mm et 106.2 mm pour l'évapotranspiration potentielle. Les valeurs les plus élevées de cette dernière sont enregistrées dans les mois de mars (153.1 mm) et avril (148.5 mm).

2.3- Bilan d'eau du bassin hydrologique de la Commune de Natitingou

Le bilan est établi sur une période de 30 ans (1979 à 2008) suivant la méthode de Thornthwaite en considérant les valeurs moyennes des paramètres que sont : les précipitations et l'ETP.

Définitions des paramètres du bilan (Tableau V)

P : C'est la précipitation. Elle est la quantité d'eau tombée en un point d'un système hydrologique pendant une période donnée généralement mensuelle.

ETP : C'est l'évapotranspiration potentielle. Elle est la quantité d'eau perdue par

évaporation ou transpiration par un stock d'eau libre dans les conditions d'une alimentation excédentaire. Elle est liée à la température de l'air, à son humidité relative, au vent et au couvert végétal.

ETR : C'est l'évapotranspiration réelle. Elle est la quantité d'eau perdue réellement par un système par évaporation ou transpiration.

RU : C'est la réserve utile. Elle représente la quantité d'eau disponible dans le sol et susceptible d'être consommée par les plantes. Selon la formule de Hallaire, elle est égale à : $RU = \left[\frac{C-F}{100} X\ h'XD\right] + 30mm$

$$\begin{cases} C: représentant\ la\ capacitéau\ champ, elle\ est\ le\ volume\ maximal\ d'eau\ que\ le\ sol\ peut\ retenir \\ F: représentant\ la\ capacité\ au\ point\ de\ flétrissement, elle\ est\ la\ limite\ inférieure\ de\ l'eau\ absorbable\ par\ les\ plantes \\ h': profondeur\ du\ sol\ en\ mm \\ D: la\ densité\ apparente\ du\ sol\ généralement\ égale\ à\ l'unité \\ 30\ mm: l'enracinement\ capillaire \end{cases}$$

Les travaux de sondage réalisés à Natitingou et ses environs par le CNERTP et la DDH montrent une couverture végétale variant entre 1 et 1,5 m avec un sol argileux. Ceci montre que $\frac{C-F}{100}$ est en moyenne égal à 10% et h = 1m.

DA : C'est le déficit agricole. Il est la quantité d'eau qui aurait pu être utilisée par les plantes si les disponibilités avaient été complétées par un système d'irrigation. DA= ETP-ETR.

Excédent : Il représente la quantité d'eau restante après soustraction des pertes par évapotranspiration et reconstitution de la réserve utile.

Ecoulement : l'excédent constitue l'écoulement dont une partie s'infiltre et alimente le bassin hydrogéologique tandis que la seconde moitié ruisselle alimentant le bassin hydrologique (selon Thornthwaite).

R : C'est le ruissellement alimentant le bassin hydrologique.

I : C'est l'infiltration alimentant le bassin hydrogéologique.

➢ Calcul des paramètres du bilan

Les paramètres du bilan et leurs valeurs moyennes sont présentés dans le tableau V.

➢ Le bilan

$$P = ETR + R + I \quad donc\ I = P - (ETR + R)$$

Or, selon la méthode de Tixéron-Berkaloff, $R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$

P = 1173,4mm ; ***ETP = 1494,4mm***

On déduit donc que :

R = 242,3mm et **I = 66,4mm**

2.4- Bilan de l'humidité du sol dans la Commune de Natitingou

Les courbes des précipitations de l'ETP et de l'ETR se présentent comme indiquées sur la figure *2*.

L'analyse de la figure 2 nous permet de délimiter quatre domaines :

- Le domaine 1 : de novembre à mai, correspond au déficit agricole (grande saison sèche) ;
- Le domaine 2 : de mai à juillet, correspond à la reconstitution de la réserve utile du sol ;
- Le domaine 3 : de juillet à octobre, est celui des écoulements ;
- Le domaine 4 : d'octobre à novembre, est celui au cours duquel la réserve constituée précédemment est utilisée par les plantes.

Tableau V: Calcul des valeurs moyennes des paramètres du bilan à partir des données de précipitations et d'évapotranspiration à la station de Natitingou (période de 1979 à 2008).

Mois / Paramètres	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
Précipitation (mm)	1,8	2,7	20,4	73,5	125,4	145,5	189,7	272	239,3	90,2	11	1,9	1173,4
ETP (mm)	127,3	129	153,1	148,5	140,2	120	108	103,6	106,2	118,7	119	120,8	1494,4
P-ETP	-125,5	-126,3	-132,7	-75	-14,8	25,5	81,7	168,4	133,1	-28,5	-108	-118,9	-321
Variation	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
RU : 100mm à saturation	0	0	0	0	0	25,5	100	100	100	71,5	0	0	
ETR	1,8	2,7	20,4	73,5	125,4	120	108	103,6	106,2	118,7	82,5	1,9	864,7
DA	125,5	126,3	132,7	75	14,8	0	0	0	0	0	36,5	-118,9	391,9
Excédent	0	0	0	0	0	0	7,2	168,4	133,1	0	0	0	308,7
Ecoulement	0	0	0	0	0	0	7,2	168,4	133,1	0	0	0	308,7

Source : Données de l'ASECNA, période de 1979 à 2008.

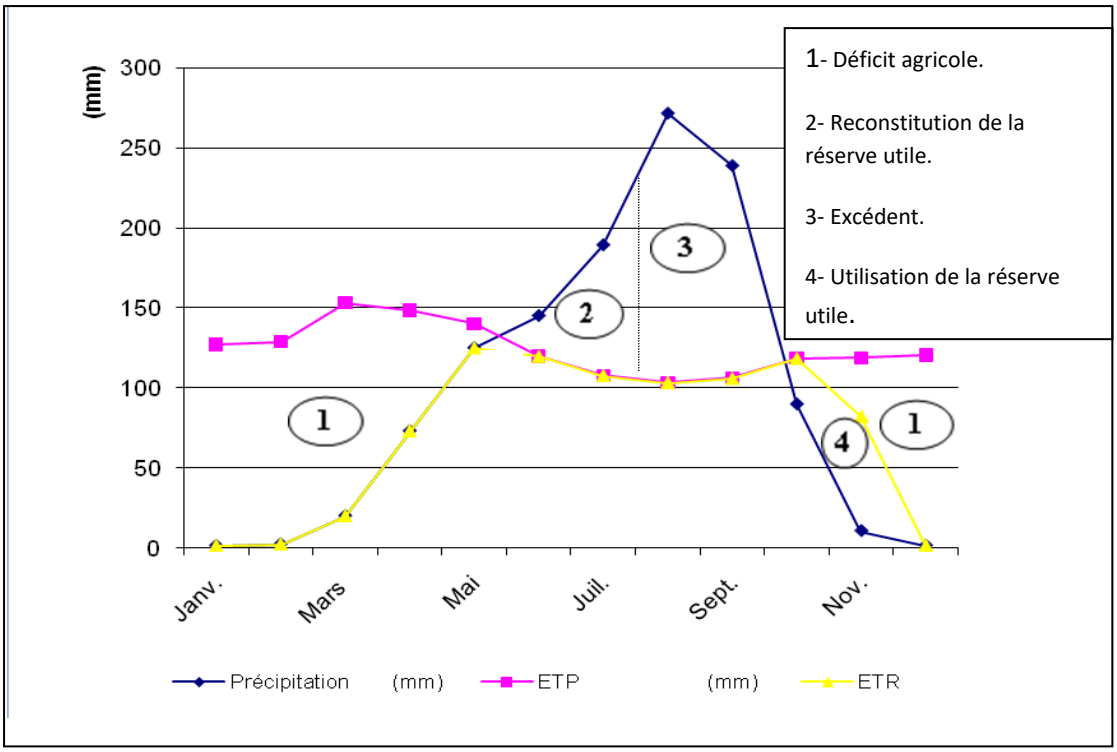

Fig.2 : Courbes des précipitations, de l'ETP et de l'ETR.

A partir du mois de juin, les premières pluies qui tombent sont entièrement repris par l'évapotranspiration. Au moment où les besoins évaporatoires de la nature sont satisfaits par les pluies tombés, les eaux pourront saturées le sol (domaine 2) puis s'infiltrer et alimenter la nappe souterraine (domaine 3). C'est ce qui arrive pendant la grande saison pluvieuse où la reprise par évaporation et par transpiration est d'ailleurs faible comme le montre la chute de la courbe de l'ETP (mai - octobre) : C'est la période de recharge des nappes (domaine 3).

En octobre, l'ETP augmente progressivement jusqu'en mars et commence par décroître à partir d'avril. Ce phénomène semble être lié à la période où souffle l'harmattan (domaines 4 et 1). En effet au cours de cette période, l'humidité relative et la pluviosité sont faibles alors que l'évaporation et la transpiration des plantes deviennent importantes ; ce qui traduit ainsi le déficit agricole enregistré.

2.5- Température

En analysant le tableau VI, il ressort que les températures varient d'une saison à l'autre et oscillent en moyenne autour de 27°C.

Les plus basses correspondent à la saison pluvieuse (de juin en octobre). Les faibles températures observées aux mois de décembre et janvier sont dues à l'harmattan. Cette période est caractérisée par une amplitude thermique mensuelle atteignant 7,7°C. La température moyenne annuelle est de 27,4°C.

Tableau VI: Evolution de la température moyenne mensuelle de 1979 à 2008.

Mois / Température	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total Annuel
Moy. des maxi (°C)	34,6	36,7	37,6	36,4	33,8	1,6	29,7	29,4	30,7	32,8	34,9	4,7	33,6
Moy. des mini (°C)	19,3	21,6	23,5	24	22,9	21,8	21,2	21,1	20,7	20,6	18,9	18,9	21,2
Moy. Mensuelle (°C)	26,9	29,2	30,6	30,2	28,35	26,7	25,5	25,3	25,7	26,7	26,9	26,8	27,4
Ecart. (°C)	7,7	7,5	7	6,2	5,45	4,9	4,2	4,1	5	6,1	8	7,9	6,2

Source : Données de l'ASECNA, période de 1979 à 2008.

2.5.1- Température et humidité relative

Les moyennes mensuelles de la température et de l'humidité relative sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau VII: Moyennes mensuelles de la température et de l'humidité relative

Mois / Paramètres	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
Température (°C)	26,9	29,2	30,6	30,2	28,35	26,7	25,5	25,3	25,7	26,7	26,9	26,8	27,4
Humidité relative (%)	53,3	54	81	117,6	140,5	151,5	159,9	163,1	158,9	144	99,8	66,1	1389,7

Source : Données de l'ASECNA, période de 1979 à 2008.

L'analyse du graphique de la figure 3, nous permet de dire que l'humidité relative et la température sont inversement proportionnelles, c'est-à-dire que les périodes les plus humides correspondent aux périodes ayant les températures les plus basses alors que les périodes les moins humides correspondent aux périodes les moins chaudes.

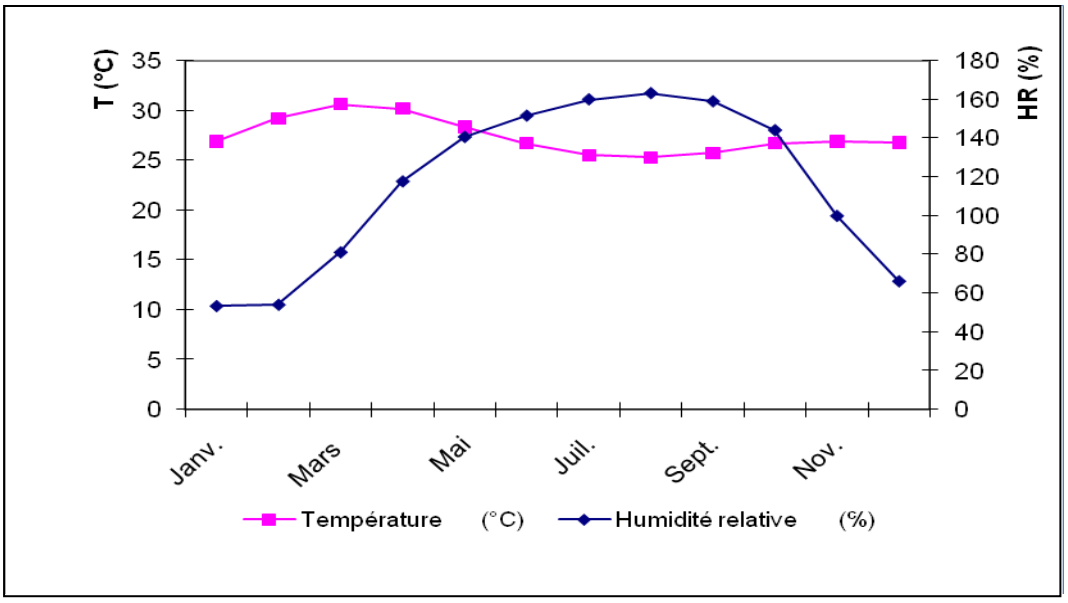

Fig.3 : Variation comparée des valeurs moyennes mensuelles de la température et de l'humidité relative.

Ainsi, la station de Natitingou présente une humidité élevée de 163,1% correspondant à la plus basse température 25,3°C. De même la température la plus élevée à savoir 29,2°C correspond au plus faible taux d'humidité relative soit 54 %.

2.5.2- Température et évapotranspiration potentielle

Les moyennes mensuelles de la température et de l'évapotranspiration potentielle sont contenues dans le tableau suivant.

Tableau VIII: Moyennes mensuelles de la température et de l'évapotranspiration potentielle

Mois / Paramètres	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Sept.	Août	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
Température (°C)	6,9	29,2	30,6	30,2	28,35	26,7	25,5	25,7	25,3	26,7	26,9	26,8	27,4
ETP (mm)	127,3	129	153,1	148,5	140,2	120	108	106,2	103,6	118,7	119	120,8	1494,4

Source : Données de l'ASECNA, période de 1979 à 2008.

L'analyse des courbes de la figure 4 nous permet de dire que l'évapotranspiration potentielle est fonction de la température, c'est-à-dire les mois les plus chauds correspondent aux mois où l'ETP est la plus élevée et les périodes froides présentent de faibles valeurs de l'ETP.

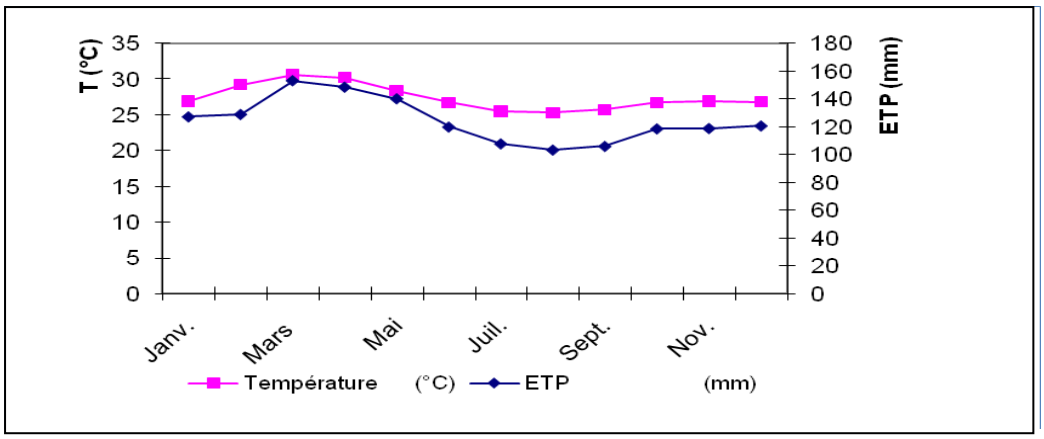

Fig.4: Variation des moyennes mensuelles de la température et de l'ETP.

Ainsi, la valeur maximale de température moyenne à savoir 30,6°C à la station de Natitingou correspond à la valeur maximale de l'évapotranspiration potentielle qui est de 153,1 mm. Il

en est de même pour la valeur la plus faible de la température (25,3°C) où l'ETP est égale à 103,6mm.

2.6- Contexte géomorphologique et géologique

2.6.1- Géomorphologie

La géomorphologie de l'Atacora en général, et de la Commune de Natitingou en particulier, est typiquement celle d'une vielle chaîne de montagne déjà érodée. Le relief est constitué de vieux monticules ne dépassant pas 400-450m, faiblement ondulé avec des entailles souvent de type petits ravins, creusés par les rivières et marigots (Perma, Sina-Issiré, Kota, Irikouakou et la sarga etc), surtout là où ils passent par les parties couvertes par des cuirasses latéritiques (Kirov, 1981 ; Yessoufou, 1991). L'érosion concerne essentiellement les formations d'âge précambrien sur des roches de résistances inégales (quartzites et micaschistes), ce qui influe directement sur le relief actuel avec des chaînons dans les quartzites et des dépressions dues à l'érosion dans les micaschistes.

Les plaines et les plateaux sont en général couverts par des sols ferrugineux, latéritiques, passant souvent à des lambeaux latéritiques peu épais près des alluvions des rivières. Sur les collines et leurs pentes, les couches de sol sont minces, en général discontinues. Une grande partie est couverte, soit par des éluvions, soit par des roches avec très peu de sols discontinus.

2.6.2- Géologie

Sur le plan géologique, la Commune de Natitingou, se situe dans l'unité structurale de l'Atacora. Celle-ci est formée des trois principaux ensembles lithologiques ci-après (Pougnet, 1955): les quartzites qui sont des formations dominantes, les schistes et des micaschistes (fig.5). Constituant l'essentiel de l'unité morphologique, les quartzites de l'Atacora ont plusieurs faciès dont le plus fréquent est une roche saccharoïde à muscovite, chloritoïde et à disthène. De granulométrie fine à grossière, ils renferment des intercalations de schistes et de micaschistes avec des intrusions subvolcaniques interstratifiées d'amphibolites albitiques (prasinites), de dolérites et de gabbros associés à des filons de quartz aurifères comme dans les secteurs de Perma (1° 30' E, 10° 11' N), Tanéka-Koko et

Alédjo-Koura. Les schistes forment des séquences de métamixites, métasilexites, d'itabirites et de cipolins calco dolomitiques localisées surtout dans la partie occidentale. Très souvent masqués par des altérites, les micaschistes quartzeux à deux micas, grenats et tourmaline sont

associés à des para- et orthogneiss ainsi que des dolérites. Ils renferment de l'albite et des reliques de grenats à auréole de chlorite, suggérant un métamorphisme polyphasé moins marqué dans les roches précédentes qui les rapprochent des unités internes des Dahoméyides (Aïcard, 1959 et Pougnet, 1957).

L'unité de l'Atacora est affectée par un métamorphisme épi à mésozonal, avec une faible rétromorphose et une tectonique polyphasée structurant les formations dans des plis isoclinaux déversés vers l'ouest, d'axe NNE-SSW à NE-SW, des fractures et des contacts tangentiels matérialisés par des écailles de chevauchement. Dans les quartzites sont observés des minéraux de haute pression métamorphique. Les âges de 1195 ± 33 Ma et 656 ± 14 Ma, obtenus par datation Rb/Sr (minéraux, roches totales) sur les quartzites correspondent respectivement au métamorphisme du faciès des amphibolites et à celui des schistes verts. Un autre âge plus jeune, 513 ± 7 Ma (KIAr), est à rapprocher d'un refroidissement métamorphique à une température plus basse (BREDA, 1982,1985).

Les formations de l'unité Structurale de l'Atacora représentent les restes d'une ancienne série sédimentaire d'âge pré-panafricain, probablement kibarien (Mésoprotérozoïque), voire éburnéen selon les âges conventionnels de 1 708 ± 220 Ma et 1925 ± 90 Ma obtenus sur les orthogneiss de Kouandé (Bonhomme, 1962).

Ces informations sont aussi confirmées par les travaux de Kriatov et al. (1980).

2.7- Hydrogéologie

Le sous-sol de la Commune de Natitingou est constitué par l'association de quartzites, schistes, filons, filonnets de quartz et de roches gneissiques notamment dans la zone de Perma. Les études d'implantation et de contrôle des travaux de réalisation des forages et de puits montrent que ces formations sont altérées et diversement tectonisées (écailles et fractures).

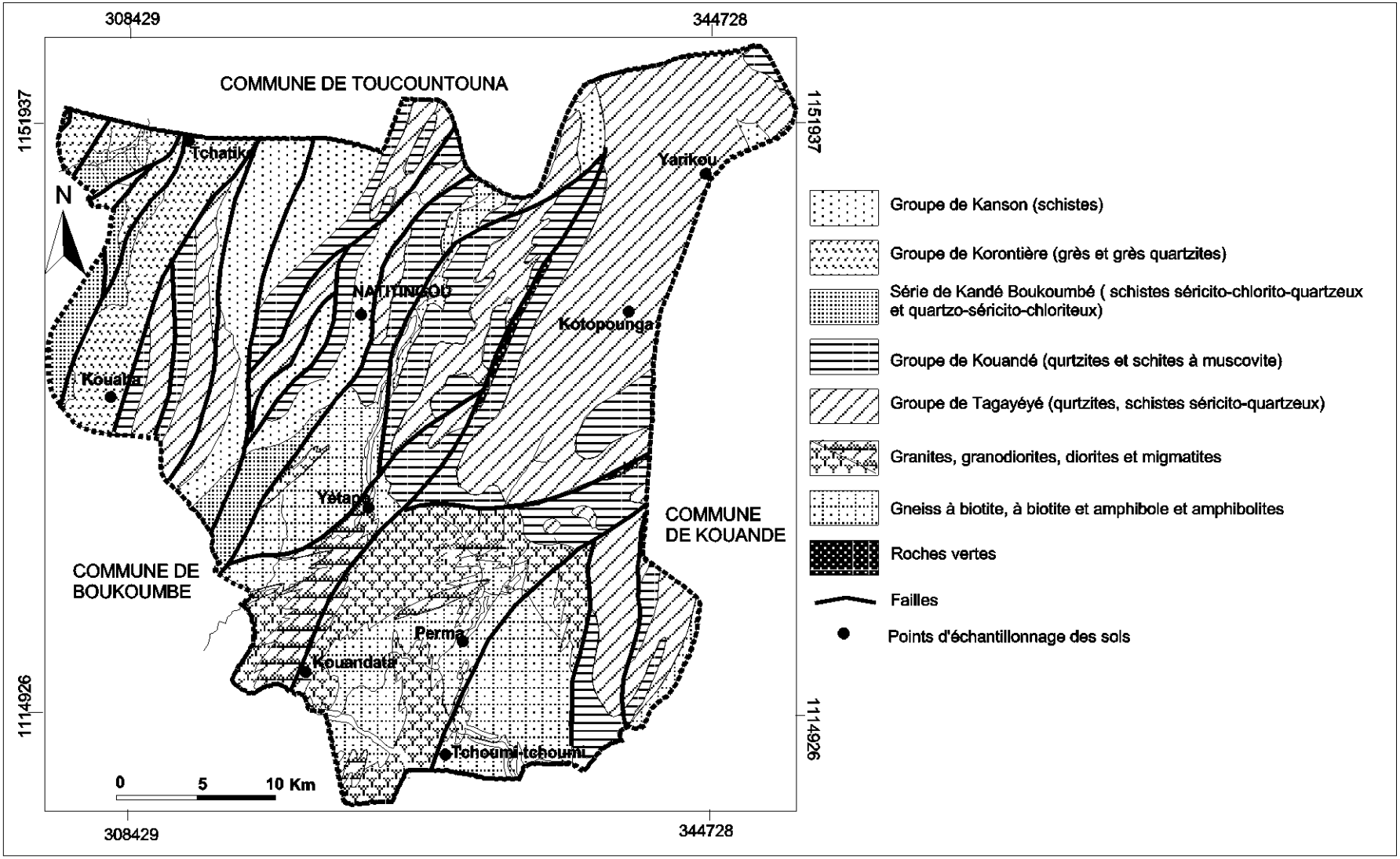

Fig.5 : Carte géologique de la Commune de Natitingou (Extraite de la carte de géologie et des minéraux utiles au 1/200 000ème , feuille de Natitingou. IGN-Paris 1972)

En résumé, on distingue du point de vue hydrogéologique, (Ahissou et Goudalo, 2004) trois différentes zones:

- la zone à substratum schisteux ;
- la zone à substratum quartzitique ;
- la zone à substratum migmatito-gneissique.

Les aquifères productifs exploités sont en liaison avec la fracturation et la couche d'altérites.

2.8- Sols, végétation, hydrographie

Les sols de la Commune de Natitingou sont en général, latéritiques, gravillonnaires, caillouteux, sablonneux, argileux. Ils sont pour la plupart lessivés ce qui a considérablement induit leur forte dégradation et réduction de leur fertilité. Les techniques culturales inadaptées et la faible capacité de gestion des eaux ont contribué à cette dégradation avancée des sols de la région. La rotation des cultures et jachères une technique de régénération des sols connue et pratiquée par les populations.

La Végétation de l'Atacora en général, a les caractéristiques d'une savane arborée, arbustive et herbacée dominée par les espèces ligneuses comme le néré (Parkia biglobosa), le karité (Vitellaria paradoxa), le Baobab (Adansonia digidata),

L'hydrographique de la Commune de Natitinngou est caractérisée par de nombreuses rivières qui s'organisent un réseau dendritique assez dense. Les principales rivières de la Commune de Natitingou, sont : Irikouakou (Yarpao), Kota, Sarga, Wémou, Koumangou, Sina-issiré, etc.

2.9- Caractéristiques des populations de la Commune de Natitingou

Selon le 3ème Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2002, la population de la commune de Natitingou est de 75 620 habitants avec 37 388 hommes et 38 232 femmes. L'arrondissement le plus peuplé est le 3ème arrondissement urbain avec 14 559 habitants et le moins peuplé est celui de Kouandata avec 3 590 habitants. 42% de cette population vit en milieu rural, et 58% dans les arrondissements urbains de Natitingou. Cette population est caractérisée par les caractères sociologiques suivants :

- Forte dominance de la population jeune ;

- Une diversité ethnique et linguistique (plus d'une dizaine d'ethnies) ;
- Forte mobilité des jeunes ;

On dénombre plusieurs groupes socioculturels et activités socio-économiques. Les plus importants sont : les Bètammaribè, les Waamas, et les Batombous. Les autres sont les Dendis, les Yoroubas, les Nagots, les Natimba, etc. Cette diversité culturelle dont regorge la Commune de Natitingou lui confère un riche patrimoine culturel doté d'un répertoire varié de danses et de cérémonies rituelles.

Le tissu social se caractérise par des liens de solidarité vivaces entre les clans, les lignages, les familles, et les personnes, surtout dans les villages (Mairie de Natitingou, mars 2005).

Leurs habitations sont en général dispersées et semi-groupées avec des constructions en terre battue, en briques argilo-sableuses, mais aussi avec des briques en dures. La toiture en paille est beaucoup plus présente.

L'économie de cette circonscription décentralisée du Bénin est majoritairement du type rural, basée surtout sur la production agricole : les céréales (mil, maïs, sorgho, riz...), les tubercules (ignames, maniocs, tarots). L'élevage concerne surtout les porcs, les volailles, les caprins, les moutons et les bœufs qui sont le plus souvent gardés par les peulhs. Le commerce de ces divers produits et leurs dérivés (fromages, œufs, beurre de karité, cossettes de tubercules...) constitue la principale source de revenue de la Commune.

Le tourisme joue un rôle très important grâce au parc de la Pendjari dans la commune de Tanguiéta, à la chaîne de l'Atacora, aux tatas sombas et aux cascades (chutes de Kota-monongou et de Tanongou). Par ailleurs, la chasse constitue aussi une activité non négligeable.

2.10- Contexte environnemental actuel du milieu d'étude

Les observations de terrain ont permis de constater que les principales activités auxquelles s'adonnent les populations de la commune de Natitingou et qui sont susceptibles de modifier l'environnement, sont principalement l'agriculture, l'orpaillage et dans, une moindre mesure, l'élevage.

Les populations de cette Commune pratiquent en effet la culture des céréales telles que le maïs, le petit mil et le sorgho (Photo 1), les ignames et le manioc notamment (Photos 2).

La culture du coton dans cette commune est très peu pratiquée. Pour optimiser les rendements, les champs sont au préalable débarrassés de tout corps végétal gênant. Seuls quelques arbustes sont laissés. C'est donc sur un sol découvert que sont pratiquées les cultures. Cette pratique est qualifiée d'agriculture extensive et se fait de façon itinérante sur brûlis comme le montre la carte d'occupation des sols de la Commune de Natitingou (fig.6). Aussi utilisent-elles des engrais chimiques tels que l'urée, le NPK. L'utilisation de ces produits à des quantités souvent supérieures aux besoins des cultures, pourrait se traduire par une perte d'azote vers les eaux souterraines, principalement sous forme inorganique oxydée (nitrate).



Photo 1 : Champ de petits mil (Cliché N'TCHA, décembre 2009)



Photo 2 : Buttes préparées pour la culture de l'igname (Cliché N'TCHA, décembre 2009)

Quant aux exploitations aurifères, elles sont de deux types : l'orpaillage artisanal (Photo 3 et 4) pratiqué par les clandestins et l'orpaillage semi-industriel (photo 5 et 6) pratiqué par la société Oracle qui exploite de l'or alluvionnaire.

L'exploitation artisanale de l'or est pratiquée par des orpailleurs légaux comme clandestins. Les orpailleurs clandestins constituent une catégorie d'exploitants moins maîtrisée et contre laquelle l'Administration minière lutte tous les jours. Elle a même installé à cet effet une Brigade spéciale de Gendarmerie sur le terrain, chargée de veiller sur le site d'orpaillage de Perma. Les orpailleurs légaux sont ceux qui travaillent sur le site sous l'autorisation et le contrôle de l'administration minière.

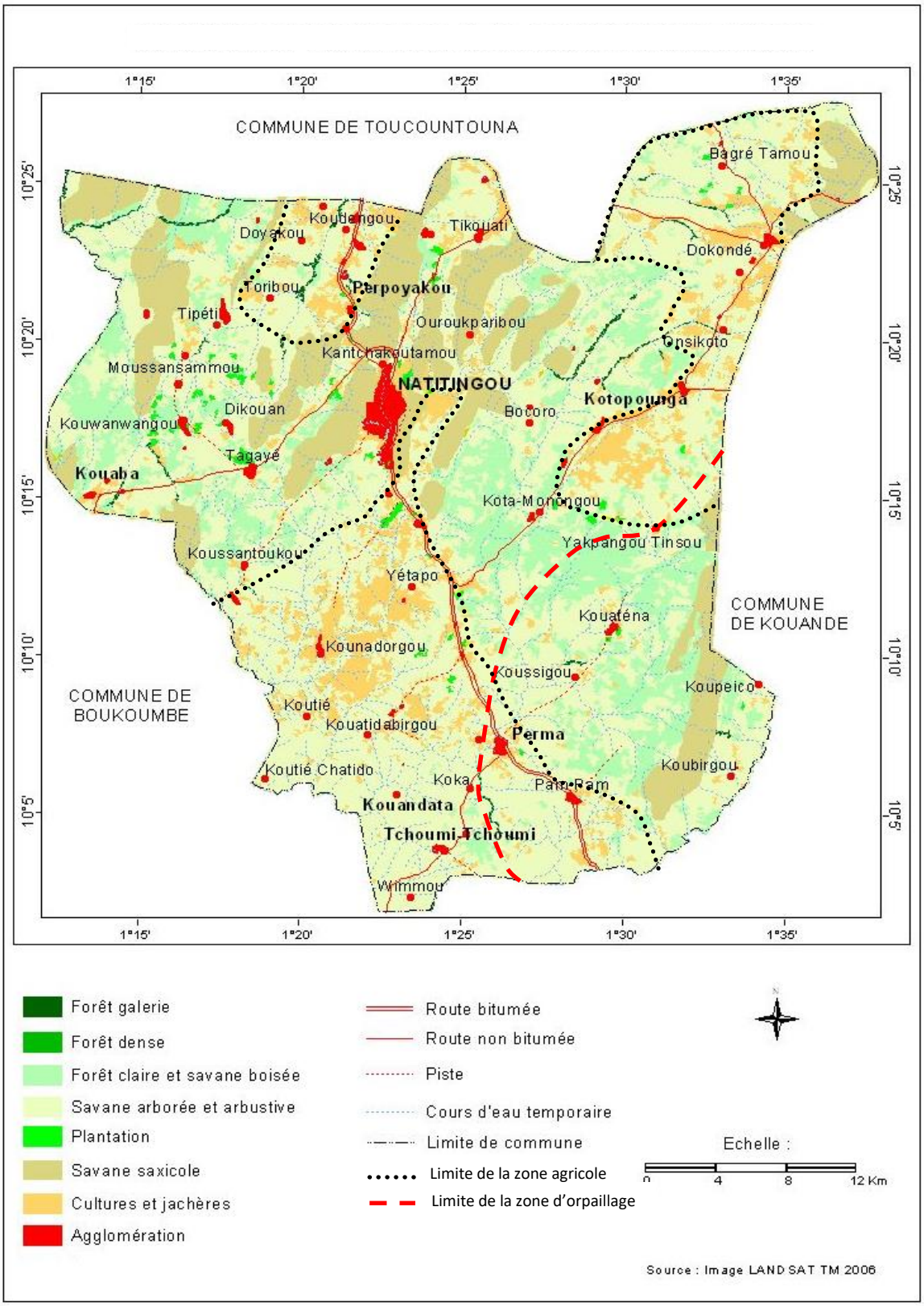

Fig.6: **Carte d'occupation des sols de la commune de Natitingou en 2006**.

Source : CENATEL

Quant aux exploitations aurifères, elles sont de deux types : l'orpaillage artisanal (Photo 3 et 4) pratiqué par les clandestins et l'orpaillage semi-industriel (photo 5 et 6) pratiqué par la société Oracle qui exploite de l'or alluvionnaire.

L'exploitation artisanale de l'or est pratiquée par des orpailleurs légaux comme clandestins. Les orpailleurs clandestins constituent une catégorie d'exploitants moins maîtrisée et contre laquelle l'Administration minière lutte tous les jours. Elle a même installé à cet effet une Brigade spéciale de Gendarmerie sur le terrain, chargée de veiller sur le site d'orpaillage de Perma. Les orpailleurs légaux sont ceux qui travaillent sur le site sous l'autorisation et le contrôle de l'administration minière. Cette dernière, qui œuvre par ailleurs pour la préservation de l'environnement et la restauration des sols à la fin des travaux d'exploitation, encadrent techniquement ces orpailleurs légaux.



Photo 3 : Lavage artisanal de l'or (Cliché N'TCHA, décembre 2009)



Photo 4 : Décapage manuel de la gangue stérile (Cliché N'TCHA, décembre 2009)

L'exploitation semi-industrielle est pratiquée par la société « ORACLE » qui exploite le placer de Perma en utilisant le bulldozer pour décaper la gangue stérile (photo 5 et 6). Le travail ici est mieux organisé et plus rigoureux. Les motopompes (Photo 7) sont également utilisées pour le lavage d'or.

Ces activités anthropiques peuvent conduire à court, moyen et long terme, à une dégradation significative de l'environnement local.



Photo 5 : Chargeuse décapant la gangue stérile

(Cliché N'TCHA, décembre 2009)



Photo 6 : Gangue stérile entassée

(Cliché N'TCHA, décembre 2009)



Photo 7 : Une motopompe aspirant l'eau pour le lavage de l'or

(cliché : N'TCHA, décembre 2009)

2.11- Conclusion

La Commune de Natitingou, située au centre du département de l'Atacora, se trouve entre les méridiens 1°12'11''et 1°36'43'' de longitude est et les parallèles 10°00'00'' et 10°27'36'' de latitude nord. D'une superficie de 1.339 km², elle est sous un climat de type soudano-guinéen caractérisé par deux saisons : une saison pluvieuse, de mai à octobre et une saison sèche, de novembre à avril. La géomorphologie, de l'Atacora en général, et de la

Commune de Natitingou en particulier, est typiquement celle d'une vielle chaîne de montagne déjà érodée. Le relief est constitué de vieux monticules ne dépassant pas 400-450m, faiblement ondulé avec des entailles souvent de type petits ravins, creusés par les rivières et marigots (Perma, Sina-Issiré, Kota, Irikouakou et la sarga etc), surtout là où ils passent par les parties couvertes par des cuirasses.

Sur le plan géologique, la Commune de Natitingou, se situe dans l'unité structurale de l'Atacora formée des trois principaux ensembles lithologiques ci-après (Pougnet, 1955): les quartzites qui sont des formations dominantes, les schistes et des micaschistes. Du point de vue hydrogéologique, on distingue trois zones à savoir : la zone à substratum schisteux, la zone à substratum quartzitique, la zone à substratum migmatito-gneissique. Les aquifères productifs exploités sont en liaison avec la fracturation et la couche d'altérites.

Les sols de la Commune de Natitingou sont en général, latéritiques, gravillonnaires, caillouteux, sablonneux, argileux. Avec une végétation en général, dominée par les espèces ligneuses comme le néré (Parkia biglobosa), le karité (Vitellaria paradoxa), le Baobab (Adansonia digidata). Les principales rivières de la Commune de Natitingou, sont : Irikouakou (Yarpao), Kota, Sarga, Wémou, Koumangou, Sina-issiré, etc.

Les principales activités auxquelles s'adonnent les populations de la commune de Natitingou et qui sont susceptibles de modifier l'environnement, sont principalement l'agriculture, l'orpaillage et dans, une moindre mesure, l'élevage.

CHAPITRE III

MATERIELS ET METHODES

3.1- Materiels

Plusieurs matériels sont utilisés pour la réalisation de cette étude.

3.1.1- Le matériel de terrain

- Une carte topographique au 1/200 000 feuille de Natitingou
- Un GPS pour repérer des stations d'échantillonnage afin de les positionner sur une carte.
- Un pH mètre RS 232 CYBER CAN 200 a servi aux mesures du pH.
- Un appareil multiparamétrique CONSORT C 532 a permis la mesure de certains paramètres physicochimiques tels que la température, la salinité des eaux, la conductivité.
- Une sonde électrique pour la mesure des niveaux statiques dans les puits.
- Des flacons en plastique de 1,5 litre pour le prélèvement des eaux.
- Une motocyclette.

3.1.2- Le matériel de Laboratoire

- De la verrerie pour les différentes analyses ;
- Des réactifs pour les dosages ;
- Un chromatographe de marque DIONEX-ICS 1000 pour faire les analyses qualitatives (par séparation des espèces présentes) et quantitative des espèces ioniques présentes dans un échantillon liquide dépourvu de matières en suspension ;
- Un ordinateur portatif

3.2- Approche méthodologique

La démarche méthodologique suivie pour la réalisation de ce travail comprend quatre étapes :

- Etude bibliographique et collecte des données
- Les travaux de terrain

- Les travaux de laboratoire
- Le traitement des données et présentation des résultats.

3.2.1- La recherche documentaire

L'objet de cette recherche est de balayer l'inventaire des techniques et méthodes employées pour mener à bien l'étude de la pollution des eaux et du sol par les métaux lourds de façon générale.

Les recherches bibliographiques ont été plus particulièrement orientées vers des sources (les mémoires de DEA et de Thèses, les articles scientifiques, les rapports et autres documents scientifiques) traitant des thèmes similaires à notre sujet. Cette étape nous a permis de nous imprégner du sujet, de recenser toutes les informations utiles et définir une orientation pour la collecte des données de terrain.

3.2.2- Travaux de terrain

Ils ont consisté à prélever sur le terrain des échantillons de sol d'une part et des échantillons d'eau de puits et de forages d'autre part.

3.2.2.1- Echantillonnage des sols

Les échantillons de sol ont été prélevés dans le cadre de la prospection minière réalisée par la société « ETRUSCAN », une compagnie canadienne opérant dans le domaine de l'or. Les échantillons ont été prélevés dans les périmètres miniers acquis par la société. La méthode de prospection utilisée est dénommée en anglais « Road Side Sampling ». Elle consiste en un échantillonnage le long des routes, pistes et sentiers (Fig.7).

Pour cet échantillonnage, de petits trous de 10 à 15 cm de diamètre, et de profondeurs variables (20 à 80 cm et parfois de 1m, selon la nature du sol, zone d'affleurement ou non, présence d'un cours d'eau ou non etc) ont été soigneusement creusés à l'aide d'une pioche puis d'une barre à mine. Le prélèvement se fait à l'aide d'une louche fabriquée à cet effet, environ 2 Kg de sol. L'échantillon est ensuite emballé dans un sachet transparent en plastique, étiqueté puis agrafé. Les points d'échantillonnage sont espacés de 500m. Au total 464 échantillons de sols ont été prélevés.

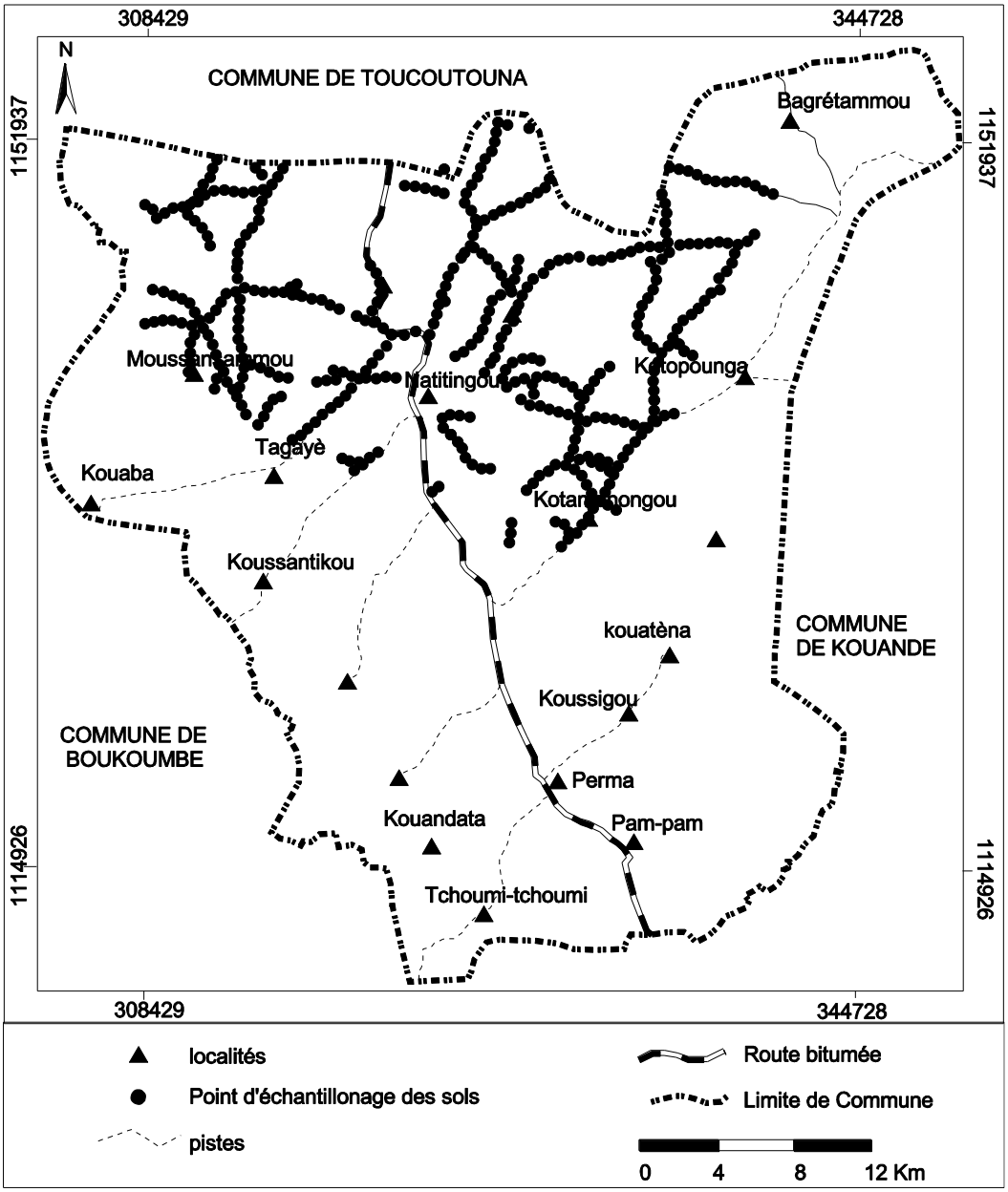

Fig.7 : **Répartition spatiale des points d'échantillonnage du sol**

3.2.2.2- Echantillonnage de l'eau

Les échantillons d'eau destinés à l'analyse physico-chimique et celle des métaux lourds, ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène afin d'éviter d'éventuels relargages des métaux. Dans les puits traditionnels et modernes, l'eau est prélevée à l'aide d'une puisette puis embouteillée de façon à éviter l'emprisonnement des bulles d'air. Par contre, au niveau des forages de la Direction Générale de l'Eau (DGeau) et de la Soneb, le prélèvement des échantillons d'eau a

été direct à la pompe motrice. Les échantillons ainsi prélevés ont été conservés au frais dans le laboratoire de la Soneb de Natitingou pendant toute la durée de la campagne de terrain. Ils ont été ensuite mis dans une glacière bien fermée puis transportés vers le laboratoire d'hydrologie appliquée de l'UAC pour le dosage des ions majeurs de l'eau , du plomb, le cadmium et le laboratoire de contrôle de qualité des eaux et aliments de la Direction de l'Hygiène et de l'Assainissement de Base (DHAB) pour le dosage du mercure. Au total 78 échantillons d'eau ont été étudiés (fig.8).

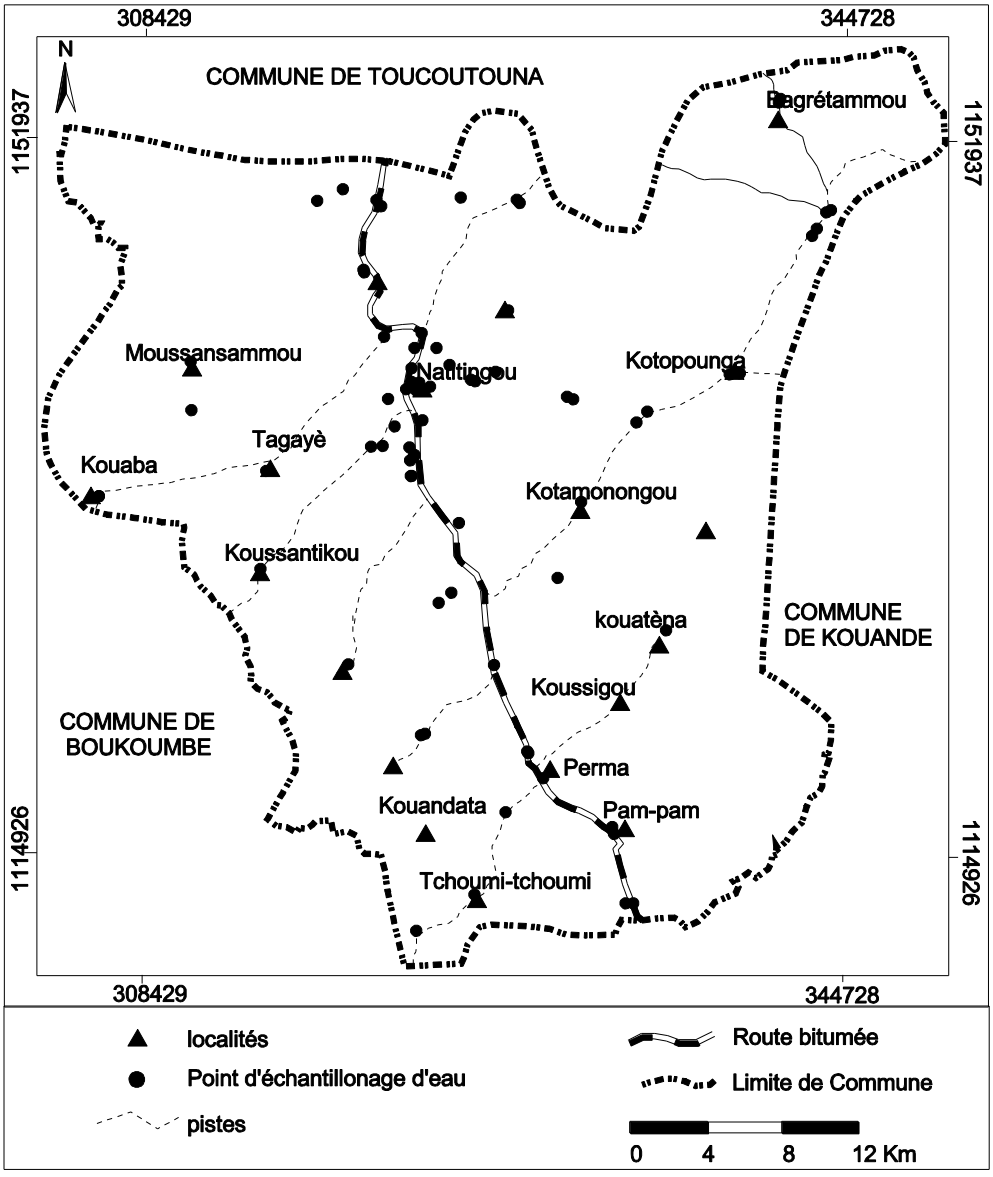

Fig.8 : **Répartition spatiale des points d'échantillonnage d'eau**

Les mesures des paramètres physico-chimiques in-situ ont concerné la température, le pH, la conductivité les TDS, l'oxygène dissous et les bicarbonates. Les mesures du pH ont été

faites avec le pH mètre RS 232 CYBER CAN 200. Le même instrument a servi aux mesures de la température. Les paramètres tels que conductivité électrique, l'oxygène dissous et le TDS ont été mesurés à l'aide de l'appareil multiparamétrique CONSORT C 532.

En ce qui concerne les niveaux statique les mesures ont été faites à l'aide d'une sonde électrique de marque SEBA HYDROMETRIE, munie d'un rouleau gradué, et d'une électrode et d'une lampe. La mesure se fait en déroulant le ruban. Lorsque l'électrode atteint le toit de l'eau, la lampe s'allume et la profondeur du niveau de l'eau par rapport au sol se lit directement sur le ruban.

3.2.3-Travaux de laboratoire

3.2.3.1- Analyse des échantillons de sols

Les échantillons de sol ont été analysés au laboratoire Abilab Ouagadougou, au Burkina Faso. La technique utilisée est l'analyse à l'eau regale (aqua regia) + ICP.

L'eau régale (en latin aqua regia ou eau royale) est un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique concentrés (2 volumes d'acide chlorhydrique pour 1 d'acide nitrique) capable de dissoudre certains métaux nobles. C'est pourquoi cette solution est aussi connue sous le nom « d'eau royale ».

Le sigle ICP désigne la technique par spectrométrie de masse. Il s'agit d'ICP-MS (ICP mass spectrometry) ». Cette technique utilise le fait que des ions peuvent être séparés les uns des autres par applications de champs électromagnétiques, en fonction de leur masse atomique, de leur charge électrique.

- *Principe de fonctionnement*:

Un générateur haute fréquence est utilisé pour chauffer un courant d'argon et former un plasma (gaz ionisé) par l'intermédiaire d'une bobine d'induction. La température atteinte est de l'ordre de 7000 à 8000°K. L'échantillon introduit dans le plasma est réduit à l'état d'atomes indépendants et d'ions. Ces atomes, excités par le plasma, ré-émettent l'énergie qu'ils ont acquise sous la forme d'un rayonnement électromagnétique (lumière).

Le spectre global est composé d'un certain nombre de raies de longueurs d'onde qui sont caractéristiques chacune d'un élément particulier. La lumière émise entre ensuite dans le spectromètre qui la disperse en séparant les différentes raies d'émission présentes dans le rayonnement. Un nombre approprié de photomultiplicateurs, un par ligne analytique (un par élément à doser), transforme l'énergie lumineuse en courant électrique (pour les appareils simultanés, alors que pour les appareils séquentiels, on utilise un seul détecteur devant lequel on fait défiler le spectre). L'intensité des raies émises par l'échantillon étant proportionnelle à la concentration des éléments qu'il contient, cela permet donc d'en faire une analyse quantitative. Le courant de chaque phototube est intégré puis digitalisé. Les informations sont alors introduites dans un ordinateur pour stockage et diffusion ultérieure, après calcul des résultats.

3.2.3.2- Analyse des échantillons d'eau.

3.2.3.2.1- Déterminations des ions majeurs

Les analyses pour la détermination des ions majeurs ont été faites à l'aide du chromatographe DIONEX-ICS 1000 du LHA. Cet appareil permet de faire l'analyse qualitative (par séparation des espèces présentes) et quantitative des espèces ioniques présentes dans un échantillon liquide dépourvu de matières en suspension. Ainsi, 1mL de l'échantillon d'eau est injecté dans le chromatographe DIONEX-ICS-1000 préalablement étalonné. Sur l'écran de l'ordinateur de pilotage, se dessine une courbe qui indique les éléments minéraux présents dans l'échantillon, de même que leurs concentrations en mg/L. Il est à noter que l'analyse des anions et cations se fait avec différents éluants.

3.2.3.2.2- Déterminations des métaux lourds

- Dosage du Mercure

Le dosage du mercure se fait par la méthode de préconcentration à la vapeur froide (Méthode 10065 HACH : 0,1 à 2,5 µg/L)

- *Principe*

L'échantillon d'eau est minéralisé pour convertir toutes les formes de mercure présent en ions mercure II (Hg^{2+}). Les ions mercure II sont transformés en vapeur de mercure dans un

système semi-clos. La vapeur est transportée à travers une colonne activée absorptive par l'air ambiant où le mercure gazeux est converti en chlorure mercurique. Le chlorure mercurique est élué de la colonne et un indicateur sensible est ajouté. L'appareil utilisé pour la lecture fait le blanc avec l'absorbance d'un indicateur non réactif. La lecture proprement dite est faite avec un indicateur complexant réactif. L'intensité de l'absorbance est fonction de la quantité de mercure présente dans l'échantillon de départ.

- *Mode opératoire* :

Le dosage du mercure par cette méthode se réalise à travers trois phases :

Phase1 : Digestion de l'échantillon

Elle se fait avec 1 Litre d'eau à analyser à laquelle on ajoute successivement sous agitation continue dans un Erlenmeyer de 2000mL, de l'acide sulfurique concentré, de l'acide nitrique concentré, du persulfate de potassium et du permanganate de potassium jusqu'à dissolution complète. Après dissolution, couvrir l'Erlenmeyer avec un verre de montre et commencer à Chauffer le mélange à 90°C tout en évitant l'ébullition. Continuer le chauffage toujours à 90°C pendant deux heures. Au bout du temps, laisser refroidir à la température ambiante en coupant le chauffage mais en continuant l'agitation. Procéder en suite à une décoloration du mélange par addition d'hydrochlorure d'hydroxylamine.

Phase2 : Préconcentration du mercure

La solution décolorée (digérée) est transférée dans la bouteille destinée à la production du gaz de vapeur froide. Les réglages nécessaires sont opérés et la distillation est lancée après ajout d'autres réactifs complémentaire. Le gaz dégagé est recueilli dans un cylindre comportant une solution fixatrice. La distillation dure en générale 5minutes. Au bout de ce temps, le contenu du cylindre est transvasé dans une cuve de lecture.

Phase3 : L'analyse colorimétrique

Pour l'analyse, le Spectrophotomètre HACH-LANGE DR2800 est allumé et l'on procède au réglage nécessaire pour le choix du programme de détermination du mercure. La solution contenue dans la cuve de lecture des réactifs de révélation ensuite ajoutée et la concentration du mercure en µg/L est lue sur le DR2800.

- Dosage du Cadmium

Méthode nitrophényl phénylazophényltriazène (1.01745.0001 MERCK)

- *Principe*

Dans une solution alcaline, les ions cadmium forment avec un dérivé de cadion

(cadion = nom trivial pour (nitro-4-phényl)-1-(phényl-4-azophényl)-3-triazène) un complexe rouge qui est dosé par photométrie.

Mode opératoire

Dans une éprouvette est introduit 1 ml du réactif Cd-1 auquel on ajoute à la pipette 10 ml de l'échantillon préparé et on agite. A la solution ainsi préparée, on ajoute à la pipette 0,2 ml du réactif Cd-2 puis on ajoute 1 micro cuiller verte arasée du réactif Cd-3 que l'on agite vigoureusement jusqu'à dissolution totale de réactif. On laisse ensuite reposer pendant 2 mn (temps de réaction) l'échantillon, puis on l'introduit dans la cuve et mesure dans un photomètre.

- Dosage du Plomb

Méthode azérosorcine pyridylique (PAR) (1.09717.0001 MERCK)

- *Principe*

Dans une solution alcaline, les ions plomb (11) forment avec le (pyridyl-2-azo)-4-résorcinol (PAR) un complexe rouge qui est dosé par photométrie.

Mode opératoire

Dans une éprouvette on introduit 0,50 ml du réactif Pb-1 et on ajoute ensuite à la pipette 0,50 ml du réactif Pb-2 puis la solution est fortement agitée pour obtenir un mélange homogène. A la solution ainsi préparée, on ajoute à la pipette 8 ml de l'échantillon d'eau préparée et on introduit l'échantillon dans la cuve et on mesure dans un photomètre.

3.2.3.2.3- Traitement informatique des données

L'analyse des résultats de laboratoire des eaux échantillonnées a été effectuée à l'aide des tableaux, des graphiques, cartes, et digrammes construits sur ordinateur. Les tableaux,

courbes et histogrammes a été réalisés avec les logiciels Microsoft Excel et Microsoft Word. Le programme Surfer 8 et le logiciel Arcview 3.2 ont été servi à la mise au point des cartes de distribution spatiale des concentrations. Enfin, le logiciel statistique SPAD a permis de construire la matrice de corrélation des paramètres physicochimiques de l'eau et les différentes classes d'échantillons d'eau. Les logiciels Excel et Diagramme, ont permis de réaliser les diagrammes de Piper pour la détermination des faciès hydrochimiques de l'eau qui constituent une méthode pratique pour identifier des eaux de nature chimique différente.

3.2.3.3- Conclusion

Les échantillons de sols et d'eau ramenés du terrain ont été analysés dans différents laboratoires. L'analyse des éléments majeurs des échantillons d'eau s'est faite par chromatographie ionique (chromatographe DIONEX-ICS 1000) au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) de la Faculté des Sciences et techniques de l'UAC. Pour la détermination des ETM des échantillons d'eau, le mercure a été dosé par la méthode de préconcentration à la vapeur froide au Laboratoire de contrôle de qualité des eaux et aliments de la Direction de l'Hygiène et de l'Assainissement de Base (DHAB) tandis que le cadmium et le plomb ont été analysés au LHA respectivement par la méthode nitrophényl phénylazophényltriazène (1.01745.0001 MERCK) et la méthode azérosorcine pyridylique (PAR) (1.09717.0001 MERCK). L'analyse des ETM des échantillons de sols, s'est faite à l'eau régale + ICP au laboratoire Abilab à Ouagadougou. Les différentes analyses ont permis d'obtenir des résultats qui serviront aux différentes analyses pour la suite de cette étude.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Caractéristiques physico – chimiques des eaux souterraines dans la commune de Natitingou.

4.1- Paramètres physiques et éléments majeurs des eaux souterraines

4.1.1- Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Les eaux souterraines étudiées proviennent d'un aquifère superficiel d'altérite pour les puits et d'un aquifère inférieur de fracture pour les forages. Les valeurs des paramètres de qualité des eaux de forages mesurées in situ, sont présentées dans les Tableaux IX, X et XI selon les différentes zones hydrogéologiques de la commune.

L'analyse des valeurs de pH des eaux étudiées permet des constater que les eaux de la zone à substratum migmatito-gneissique de la plaine de Perma ont un pH compris entre 5.3 et 7.3. Par contre les eaux des forages situés dans les zones schisteuse et quartzitique ont un pH généralement situé entre 4.1 et 6.75. Les eaux de la zone quartzitique présentent les pH les plus faibles compris entre 4.6 et 5.12. Ce sont donc des eaux agressives (Sambiénou et Yantikoua, 2009). Le caractère acide de ces eaux peut s'expliquer par une forte production du CO_2 biogénique dans le milieu (Alassane, 2000). La Commune de Natitingou étant une zone dont les principales activités rémunératrices sont l'agriculture (fig.6) et l'élevage, l'activité biologique peut libérer de fortes quantités de CO_2 qui en solution dans l'eau donne de l'acide carbonique selon la réaction :

$$\boldsymbol{CO_2 + H_2O \Leftrightarrow H_2CO_3}$$

Il s'agit d'un diacide faible caractérisé par deux constantes d'équilibre. La dissociation de cet acide se fait en deux étapes dont les réactions d'équilibre sont (Banton & Bangoy, 1997).

$$\boldsymbol{H_2O \Leftrightarrow H^+ + OH^-} \qquad \boldsymbol{Ke = [H^+] + [OH^-]}$$

$$\boldsymbol{H_2CO_3 \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-} \qquad \boldsymbol{K_{H_2CO_3} = 10^{-6,35}}$$

$$\boldsymbol{HCO_3^- \Leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}} \qquad \boldsymbol{K_{HCO_3^-} = 10^{-10,25}}$$

En ce qui concerne la conductivité électrique (C.E), les eaux de la plaine à substratum métamorphique de Perma ont des conductivités variables (Tableau IX) de moins de 100 µS/cm (69.4 µS/cm au niveau du forage A3040 de Koussantikou) à plus de 1000µS/cm (1661µS/cm au niveau du forage A2925 de Pam-pam). En se conférant au tableau I et les tableaux IX, X et XI, les eaux des échantillons présentant les valeurs de la conductivité

électrique inférieures à 100 µS/cm sont très faiblement minéralisées et d'autres présentent les minéralisations importantes.

Cette minéralisation élevée dans certains forages serait due aux minéraux constitutifs des roches (gneiss, amphibolites, migmatites diorites et granodiorites). Ce sont eux qui contribuent à la minéralisation progressive conférant aux eaux de ce secteur du socle une forte minéralisation. Quant aux eaux de la zone quartzique, un seul échantillon a présenté une conductivité élevée (444 µS/cm), supérieure à la valeur guide O.M.S qui est de 300 µS/cm, le reste présentant une conductivité comprise entre 40 et 200 µS/cm.

Tableau IX: Paramètres physico-chimiques des eaux de forage du substratum métamorphique de la zone migmatito-gneissique de la plaine de Perma (Sud de la commune de Natitingou)

Code	Localité	pH	conductivité (µS/cm)	Température (°C)	Salinité (g/L)	TDS (mg/L)
FORAGE A254	YETAPO	5.9	674	30	0	653
FORAGE A3040	KOUSSANTIKOU	5.3	69.4	28.3	0	67
FORAGE A900	TIGNINTI	5.6	375	30	0	364
FORAGE A2827	KOUNANDORGOU	6.25	181.8	28.9	0	176
FORAGE A2957	KOUANDATA	6.26	403	30.1	0	391
FORAGE A3044	TIGNAMPETI	6.4	888	29	0.2	861
FORAGE A2775	KOUATERNA	5.52	131.7	28.4	0	128
FORAGE A902	KOKA	6.6	938	29	0.2	910
FORAGE A2925	PAM-PAM	7.3	1661	31.2	0.7	1610
FORAGE A2952	SINAICIRE	6.33	551	30.1	0	534
FORAGE A907	TCHOUMI-TCHOUMI	6.4	1201	30	0.4	1165

Les eaux de la zone quartzitique présentent donc une minéralisation faible. La composition minéralogique des roches (quartzites) étant essentiellement quartzeuse, celles-ci ne confèrent aux eaux souterraines de cette zone, qu'un niveau de minéralisation en général faible. Si leur temps de séjour dans ces réservoirs se révèle très long, cette minéralisation peut être moyenne. Ceci pourrait expliquer la minéralisation relativement élevée notée au niveau du forage A2531 situé dans le village de Yarikou. Les eaux de la zone schisteuse présentent une minéralisation analogue à celle de la zone quartzitique.

Les solides totaux dissous (TDS) comme la conductivité électrique (C.E) décrivent les sels inorganiques présents en solution dans l'eau. Les valeurs des TDS des eaux étudiées sont très variables mais restent tout de même élevés pour les eaux du substratum migmatito-gneissique. Ces variations de paramètres physico chimiques, montrent qu'à la différenciation des faciès géologiques correspond une différenciation des eaux souterraines (Boukari, 1982).

Tableau X: Paramètres physico-chimiques des eaux de forage de la zone quartzique.

Code	Localité	pH	conductivité (µS/cm)	Température (°C)	Salinité (g/L)	TDS (mg/L)
FORAGE A177	DITANWAN	4.97	44.9	29.7	0	43
FORAGE A2558	TIKOUATI	4.94	40	28.5	0	39
FORAGE A3214	KOTA-MONONGOU	4.76	44.6	28.3	0	43
FORAGE A3026	POUYA	4.71	145.4	27.6	0	141
FORAGE A1004	KOTOPOUNGA	4.92	40.1	27	0	39
FORAGE A110	WETIPOUNGA	4.69	122	27.6	0	118
FORAGE A2531	YARIKOU	4.6	444	28	0	431
FORAGE A3002	BANGRETAMOU	4.6	90.1	28.1	0	87
FORGE A922	TAGAYE	5.12	161.5	29.4	0	157
FORAGE A171	KOUTANONGOU	4.81	57.8	28.8	0	56

Tableau XI : Paramètres physico-chimiques des eaux de forage de la zone schisteuse

Code	Localité	pH	conductivité (µS/cm)	Température (°C)	Salinité (g/L)	TDS (mg/L)
FORAGE A2523	WINKE	4.1	783	29	0.1	760
FORAGE A2559	KANTABORIFA	5.3	81.5	25.4	0	79
FORAGE A1250	OUROUBOUGA	6	47.8	27.6	0	46
FORAGE A2529	GNIMPORIMA	5.4	100.9	28.5	0	98
FORAGE A2462	PEPORIYAKOU	5.93	208	29.3	0	202
FORAGE A2527	KABAKOUDENGOU	6.39	416	29.7	0	404
FORAGE A2556	DOYAKOU	6.75	278	29.1	0	270
FN3	FN3	5.63	116.5	29	0	112
FN7	FN7	5.85	174.9	29.1	0	168

4.1.2- Eléments chimiques majeurs des eaux et leurs origines

Les teneurs en éléments majeurs dosés dans les échantillons d'eau de forages et de puits sont consignés dans les tableaux XII et XIII.

Les éléments majeurs d'une eau naturelle sont les cations Ca^{2+}, Na^{+}, Mg^{2+}, K^{+} et les anions HCO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}, NO_3^{-}. Ce sont les éléments indiqués classiquement sur les bouteilles d'eaux minérales. Afin d'apprécier les processus ayant contribué à la minéralisation des eaux de notre secteur d'étude, la matrice de corrélation des différents éléments chimiques a été construite (Tableau XIV).

4.1.2.1- Calcium et Magnésium

Les concentrations de l'ion calcium (Ca^{2+}) dans les échantillons varient entre 0.53 mg/L et 70.26 mg/L et celles des ions magnésium (Mg^{2+}) entre 0.08 mg/L et 21.24 mg/L. Les très faibles concentrations de ces ions sont observées surtout dans les eaux des zones quartzitique et schisteuse et les valeurs relativement élevées dans les eaux de la zone migmatito-gneissique. Les faibles valeurs pourraient s'expliquer par la composition minéralogique et la nature chimique des roches présentes dans ce secteur puisque le calcium et le magnésium proviennent de l'hydrolyse des minéraux silicatés tels que la dolomite de formule chimique

$CaMg(CO_3)_2$, l'Ankérite de formule chimique $Ca(Fe, Mg, Mn)(CO_3)_2$, la Benstonite de formule chimique $(Ba, Sr)_6(Ca, Mn)_6Mg(CO_3)_{13}$, l'huntite de formule chimique $CaMg_3(CO_3)_4$, etc, absents dans les quartzites et micaschistes.

La comparaison de toutes les concentrations de calcium, magnésium dans tous les échantillons d'eau étudiées avec les valeurs guides O.M.S (respectivement 100mg/L, 150 mg/L) pour la qualité de l'eau de boisson, montre qu'elles sont dans la limite permise.

Le calcium se corrèle avec le magnésium (r = 0.64). Les deux ions proviendraient alors d'une même origine. L'origine probable de ces deux ions serait l'hydrolyse des silicates contenus dans les formations géologiques de la région.

Tableau XII : Résultats d'analyse des éléments majeurs des eaux de forages échantillonnées dans la Commune de Natitingou.

Nom des localités	Code (LOC)	Na	NH_4	K	Mg	Ca	F	Cl	NO_2	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	Br
OUROUBONA	F1	23.76	0.27	2.57	10.51	22.5	0	3.12	0	0.13	4.61	0.03	134	0
FN1B	F2	0.16	0	0.07	0.1	0.64	0.02	5.3	0.03	4.8	0.06	0.05	60	0
FN3	F3	4.74	0.2	2.15	0.9	4.85	0	4.27	1.06	6.73	0.03	0.11	26	0.77
FN7	F4	0.13	0	0.07	0.08	0.55	0	1.05	0.26	0.92	0.45	0.4	38	0.13
FN8	F5	5.06	0.13	1.04	12.32	18.72	0	1.14	0	0.37	0.83	0.02	118	0.03
KOUABA	F6	1.56	0	3.2	1.35	11.49	0	3.43	0.3	6.03	1.52	0.03	76	0
TEDONTE	F7	7.83	0.13	7.7	1.28	26.57	0	11.34	0	9.61	0.83	5.64	236	0
KOTOPOUNGA	F8	1.98	0.11	0.54	0.16	1.9	0.01	0.08	0.02	0.01	0.47	0.04	16	0.09
WETIPOUNGA	F9	4.68	0.13	2.46	0.51	3.03	0	5.46	0	18.34	0.77	0.3	32	0
OUROUBOUGA	F10	0.76	0.08	1.19	0.16	1.09	0	1.74	0.02	1.17	1.54	0.04	26	0.03
KOUTANONGOU	F11	4.96	0.11	1.36	0.13	2.33	0	2.83	0	0.08	0.1	1.66	54	0
MOUSSANSANMOU	F12	4.68	0.2	1.65	3.37	6.5	0	1.16	0	1.06	0.11	1.45	84	0
DITANWAN	F13	1.34	0.1	0.77	0.27	0.92	0	1.31	0.01	0.1	0.37	0.03	20	0.04
KANTCHAGOUTAMOU	F14	2.4	0.23	1.16	0.44	1.91	0	1.4	0.02	0.62	0.06	0.02	42	0
PEPORIYAKOU	F15	78.12	0.98	20.78	5.14	37.68	0	0.09	0.02	0.03	0.47	0.1	92	0.04
BOCORO	F16	3	1	2.18	0.27	1.6	0	2.09	0	0.35	0	0.15	36	0.05
WINKE	F17	24.56	3.07	14.06	4.6	28.94	0	27.26	0	96.28	0.25	0.31	2	0
KABAKOUDENGOU	F18	16.33	0.4	2.27	6.62	16.12	0	1.27	0.12	1.23	1.77	1.22	150	0.03
GNIMPORIMA	F19	4.62	0	2.36	0.3	5.95	0	2.77	0.02	1.27	0.16	0.04	54	0
YARIKOU	F20	22.61	0.25	13.59	1.56	6.25	0.01	18.23	0.3	25.62	0.46	1.67	22	0
YETAPO	F21	18.76	0	3.98	12.4	28.29	0	3.12	0.97	1	1.33	0.03	206	0.03
DOYAKOU	F22	22.74	0.4	1.31	7.27	29.81	0	0.15	0.01	0	0.43	0.03	162	0.36
TIKOUATI	F23	3.6	0.1	3.07	1.4	24.97	0	1.26	0	2.38	0.3	0.05	24	0
KANTABORIFA	F24	2.98	0.46	2.03	0.82	9.44	1.01	1.6	0.05	0.57	4.1	0.04	16	0.1
KOUATERNA	F25	3	0.14	1.1	3.2	4.35	0	2.1	0	0.58	0.35	0.19	88	0.08
KOUNANDORGOU	F26	17.68	0.31	3.64	1.6	15.48	0	4.41	0	1.11	0.44	1.04	64	0.02
TETANTE	F27	37.76	4.4	20.91	0.93	10.48	0	8.15	0	10.31	0.4	0.23	18	0
PAM-PAM	F28	55.25	2.57	21.74	19.83	58.31	0	5.4	0	0.2	0.04	174.7	236	0.02
SINAICIRE	F29	13.97	0.41	7.3	0.7	14.3	0	1.93	0	0.24	0.08	0.98	130	0.04
MOUPEMOU	F30	6.48	0	1.98	5.52	13.95	0	0.01	0	0.18	0.08	0.13	224	0.05
KOUANDATA	F31	5.3	0.09	1.23	2.01	2.85	0	1.32	0	0	1.12	0.4	130	0
BANGRETAMOU	F32	3.73	0.11	1.73	0.43	2.92	0	6.1	0	10.51	0.05	0.36	46	1.21
POUYA	F33	7.9	0.3	2.73	0.88	3.71	0	0.17	0.03	0.55	0.13	0.06	48	0.03
KOUSSANTIKOU	F34	6.62	1.06	3.23	1.03	3.8	0	1.9	0.21	0.93	0.13	0.02	44	0
TIGNAMPETI	F35	31.21	0.47	5.05	10.06	52.02	0.02	0.06	0	0.06	0.26	0.17	208	0.1
KOTA-MONONGOU	F36	1.91	0.12	0.94	0.35	1.38	0	2.9	0	4.32	0.23	0.06	26	0.05
TIGNINTI	F37	17.84	0	5.27	3.05	14.3	0	1.35	0.04	0.05	1.11	0.3	114	0.1
KOKA	F38	24.31	0.8	6.08	21.24	37.84	4.16	11.65	0	9.9	5.63	0.02	236	0
TCHOUMI-TCHOUMI	F39	27.62	0	6.21	14.41	70.26	1.45	4	0	0.02	228.4	0.62	210	0.02
KOUANWANRGOU	F40	3.76	0.15	2.94	0.85	3.44	0	2.4	0	4.2	0.22	0.17	38	0
FORAGE ST-PAUL	F41	4.88	0.4	1.93	4.23	8.5	0	1.31	0.03	1.52	0.31	0.73	70	0.03
TAGAYE	F42	2.47	0	3.58	1.41	11.39	0	6.24	0.4	14.32	11.03	0.04	50	0.41

Tableau XIII : Résultats d'analyse des éléments majeurs des eaux de puits échantillonnées dans la Commune de Natitingou.

Nom des localités	Code (LOC)	Na	NH_4	K	Mg	Ca	F	Cl	NO_2	NO_3	PO_4	SO_4	HCO_3	Br
KANTCHAGOUTAMOU	P1	14.14	0.46	3.16	0.64	3.95	0	20.02	0	13.95	0.22	2.07	78	1.3
SOUNTCHIRATIKOU	P2	23.76	0.36	3.83	0.73	3.03	0	0.27	0	0.65	0.18	0	36	0.07
YOKOSSI P	P3	20	0.29	4.64	12.44	27.97	0.01	0.43	0.04	1.22	0.2	0.12	26	0
BAGRI P	P4	74	1.84	19.68	4.85	35.89	0	1.82	0.14	5.05	0.06	0.11	68	0.07
DJINDJIREBERI	P5	178.3	20.24	73.12	13.9	47.52	1.65	284.88	0	437.72	49.41	0.02	58	0
TCHIRIMINA	P6	18.81	1.1	9.51	14.1	27.66	0	13.13	0	13.77	0.64	2.81	126	0
BORIYOURE	P7	4.19	0.07	1.23	0.37	2.9	0	20.6	0	70.37	0.18	0.05	40	0
BOCORO	P8	11.57	0.67	6.25	0.86	11.22	0.02	0.05	0	0.07	0.23	0.02	30	0.03
SANTA	P9	43.7	0	16.4	4.8	17.4	0	0	0.02	0.06	0.06	0.44	74	0.02
OURKPARBOU	P10	3.78	0	3.78	1.95	35.66	0	3.25	0	5.16	0.44	1.9	106	0
OUROUBONA	P11	8.64	0.48	5.05	10.84	41.25	0.05	9.41	0.15	4.83	4.77	0.03	148	0.1
YETAPO	P12	38.2	4.68	12.71	2.26	17.16	0	4.25	2.3	0.26	0.41	0.1	64	0.04
WINKE	P13	61.9	0.81	32.67	10.55	46.23	0.02	1.98	0.07	3.3	1.68	0.11	56	0
KANTABORIFA	P14	23.4	0	2.27	0.7	9.5	0.45	13.55	0.08	50.78	6.71	0.02	50	0
OUROUBOUGA	P15	13.15	0.12	1.81	1.34	14.35	0	18.41	0	54.7	0	1.38	40	0
GNIMPORIMA	P16	5.23	0	3.18	1.26	52.57	0	0.03	0.11	0.21	1.6	0.08	166	0.3
PEPORIYAKOU	P17	8.93	1.06	3.87	1.06	12.51	0	2.98	0.24	0.03	2.74	0.03	74	1.02
KABAKOUDENGOU	P18	3.3	7.1	28.62	0.17	67.96	0	0.11	0.14	0.02	0.08	0.03	280	0
DOYAKOU	P19	30.77	0.58	4.56	0.37	14.46	0	10.97	3.4	10.26	0.07	3.24	64	0
TIKOUATI	P20	6.93	0.47	8.1	2.55	9.57	0	10.86	0	37.13	1.4	1.78	48	0
POUYA	P21	15.5	0.92	8.71	1.08	13.15	0.4	9.71	0.7	27.11	3.43	0.02	36	0
KOTOPOUNGA	P22	19.03	0.34	11.22	3.3	14	0	25.52	0	133.7	0.62	0.73	31	0
WETIPOUNGA	P23	17.67	0.52	4.27	0.35	5.8	0	5.57	0	18.05	0.33	0.08	54	0.43
YARIKOU	P24	16.1	0	11.7	1.35	29.23	0	16.82	0	39.43	7.63	0.02	80	0.02
BANGRETAMOU	P25	17.72	0.63	40.56	3.48	14.11	0	30.51	0	97.78	0.4	5.68	62	0
KOUABA	P26	17.05	0.9	5.96	1.25	7.83	0	4.14	0.08	0.13	0.13	0.2	50	0.17
KOUANWANRGOU	P27	2.33	0.2	0.87	0.96	5.26	0	2.73	0.02	2.46	0	0.63	94	0.02
MOUSSANSANMOU	P28	8.16	0.2	2.05	0.74	2.05	0	0.11	0	0.3	0.4	0.04	36	0
TEDONTE	P29	16.84	1.64	12.5	0.67	5.65	0	11.31	0	11.83	0.75	7.17	90	0.55
KOUANDATA	P30	25.87	0.5	2.64	0.32	14.34	0	27.1	0	30.43	0.17	2.12	60	0
TIGNAMPETI	P31	5.81	0.22	2.07	0.52	12.51	0	5.05	0.01	0.1	3.4	0.12	80	0
PERMA	P32	23.73	0.4	5.3	5.02	45.13	0.01	13.5	0	9.26	1.86	5.43	248	0.64
PAM-PAM	P33	16.02	0.38	4.26	3.54	9.01	0	24.26	0	18.8	0	5.38	174	0.75
SINAICIRE	P34	32.82	1.5	11.93	3.07	16.14	0	2.15	0	11.72	0.16	3.24	28	0
BERECINGOU	P35	1.68	0	0.61	1	2.61	0.48	1.7	0.1	1.22	1	0.13	40	0.03
KABAKOUDENGOU	P36	1.36	0.13	0.6	0.1	0.53	0	3.77	0	20.82	0.02	0.54	28	0.28

4.1.2.2- Chlorures et Sodium

Les concentrations en ions chlorure (Cl^-) et sodium (Na^+) dans les eaux analysées, à l'exception de Djindjirébéri, sont toutes inférieures à la valeur limite acceptable (respectivement 250 mg/L et 150 mg/L) pour l'eau de boisson. Les concentrations en ions chlorure et sodium dans le puits de Djindjirébéri (respectivement 284.88 mg/L et 178.3 mg/L), sont sûrement dues aux apports extérieurs d'origine anthropique, les chlorures, n'entrant pas surtout dans la composition chimique des minéraux des roches de la zone d'étude. Le coefficient de corrélation entre ces deux ions (r = 0.11) très faible, montre que les ions ne sont pas liés. Ils proviennent donc d'une même origine. En effet le sodium pourrait être issu de l'altération des certains minéraux contenues dans les formations géologiques tandis que les ions chlorures pourraient être reliés aux rejets humains, en particulier l'urine et certains produits d'entretien.

4.1.2.3- Les sulfates

Les sulfates sont des éléments chimiques qui peuvent altérer la qualité de l'eau souterraine lorsque leurs concentrations dépassent la valeur guide 200mg/L. Les ions sulfate (SO_4^{2-}), à des concentrations supérieures à la valeur guide dans l'eau de boisson peuvent provoquer des diarrhées chez l'être humain.

Les concentrations des ions sulfates dans nos échantillons, sont très faibles et se situent entre 0 mg/L et 174.7mg/L. Ces valeurs sont toutes dans la limite permise pour l'eau de boisson (200 mg/L). Les ions SO_4^{2-} n'ont pas présenté de corrélation avec le calcium. Les ions sulfates ne proviendraient donc pas de formations gypseuses. Leur origine probable pourrait être l'oxydation de la pyrite (conditions oxydantes en saison des pluies), minéral présent dans les formations géologiques de la région. Leur passage dans l'eau se serait fait suivant la réaction :

$$FeS_2 + 15/4\ O_2 + 7/2\ H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3 + 4\ H^+ + 2\ SO_4^{2-}$$

Si les sulfates (SO_4^{2-}) peuvent provenir des roches (de la zone quartzique et schisteuse), notamment des sulfures, il est aussi vraisemblable que ces anions, en plus des nitrates (NO_3^-), et une partie des cations, pourraient avoir aussi leur origine dans les eaux de pluie et du lessivage des sols par celles-ci. En effet, plusieurs auteurs, Sarazin et al. (1976). Bourrie (1978) et Lelong et al. (1989), rapportés par Faillat et al. (1993), ont montré que dans certains cas, la totalité des anions d'acides forts (Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-) et plus de la moitié des

cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}), pouvaient, en zone de socle, être apportées par les précipitations. De tels bilans hydrochimiques ne peuvent être faits dans cette étude faute d'analyses des eaux de pluies.

Tableau XIV : Matrice de corrélation des différents paramètres de la qualité des eaux de forages et de puits échantillonnées.

	Na	NH4	K	Mg	Ca	F	Cl	NO2	NO3	PO4	SO4	HCO3	Br	Dureté
Na	1													
NH4	0.34	1												
K	**0.64**	0.58	1											
Mg	0.44	0.06	0.25	1										
Ca	0.51	0.37	0.48	**0.64**	1									
F	0.07	-0.01	-0.02	0.47	0.24	1								
Cl	*0.11*	0.06	0.29	0.01	0.02	0.07	1							
NO2	0.15	0.2	0.03	0.06	0	-0.04	0.02	1						
NO3	0.06	0.04	0.31	0.07	0.03	-0.02	**0.81**	-0.06	1					
PO4	0.09	0.07	0	0.29	0.39	0.33	-0.02	-0.03	-0.05	1				
SO4	0.27	0.19	0.24	0.39	0.28	-0.03	0.02	-0.02	-0.04	-0.02	1			
HCO3	0.18	0.18	0.16	0.57	**0.7**	0.27	-0.02	-0.04	-0.21	0.23	0.27	1		
BR	-0.09	0.06	-0.14	0.14	0.1	-0.08	0.14	0	-0.07	-0.04	-0.02	0.05	1	
Dureté	0.53	0.29	0.44	**0.82**	**0.96**	0.34	0.02	-0.02	-0.05	0.38	0.35	**0.72**	-0.12	1
	Na	NH4	K	Mg	Ca	F	Cl	NO2	NO3	PO4	SO4	HCO3	Br	Dureté

Les coefficients en gras indiquent les corrélations significatives c'est-à-dire > 60

4.1.2.4- Les nitrates

Les ions nitrate (NO_3^-) sont présents dans la nature où ils font partie du cycle de l'azote. Ils représentent la forme la plus soluble de l'azote. Principalement utilisés comme engrais inorganiques pour la croissance des plantes et la synthèse de composés azotés

organiques, les nitrates en excès peuvent se retrouver rapidement dans les eaux souterraines. Les déchets contenant de l'azote organique représentent aussi une source de nitrates obtenus à partir de différents processus biochimiques (ammonification et nitrification).

Les concentrations de nitrates dans les eaux analysées varient entre 0mg/L et 437.72 mg/L. Sept échantillons, soit 8.64%, présentent des concentrations supérieures à la valeur guide de l'O.M.S qui est de 50 mg/L pour l'eau de boisson. Les concentrations en NO_3^- dans les puits de **Djindjirébéri** (437.72 mg/L), Kotopounga (133 mg/L), Banguirétamou (97.78 mg/L), **Winkè** (96.28 mg/L), **Boriyouré** (70.37 mg/L), **Kantaborifa** (50,78mg/L), supposent une contamination. En effet, la position géographique de ces puits, situés pour la plupart en milieu urbain, notamment dans les quartiers de Natitingou (en gras), pourrait témoigner d'une origine anthropique de cet élément chimique. Les concentrations de NO_3^- des points d'eaux restants, tout en restant inférieures à 50 mg/L supposent, pour la plupart des échantillons, une contamination exogène qui pourrait être liée aux activités agricoles menées dans la zone d'étude. En effet la plupart des terres agricoles de la commune ne sont plus productives ce qui amènent les paysans à utiliser les engrais minéraux afin d'améliorer le rendement. Une très bonne corrélation (r = 0.81) a été notée entre les nitrates et les chlorures. Cette dernière observation confirme que les nitrates et les chlorures seraient issus d'un apport extérieur. A cette source probable, il faut ajouter la source naturelle des nitrates liée la décomposition de la matière organique végétale.

4.1.2.5- Les fluorures

Un autre élément très important dans l'eau de boisson lié à la santé est le fluor. Celui-ci se présente dans l'eau sous forme d'ions fluorure (F^-). Le fluor dans l'eau provient principalement de la dissolution des minéraux naturels présents dans les roches et les sols avec lesquels l'eau réagit. La fluorine (CaF_2), le fluoapatite ($Ca_5F(PO_4)$ et les micas sont les principaux minéraux qui le contiennent. Les concentrations des ions F^- inférieures à 0,5 mg/L dans l'eau de boisson peuvent favoriser la carie dentaire (Jordana et *al* ; 2004) cité par (Matini et *al*, 2009). Selon l'O.M.S, dans «Directives de qualité pour l'eau de boisson» (2000) rapporté par (Matini et *al*, 2009), à de très fortes concentrations (au-dessus de 1,5 – 2 mg/L), le fluor dans l'eau de boisson peut occasionner une fluorose dentaire ou osseuse.

Dans les eaux analysées, les concentrations des F^- se situent entre 0 mg/L et 4 .16 mg/L. Deux échantillons ont dépassé la valeur guide O.M.S qui est de 1,5 mg/L pour l'eau de

boisson. Il s'agit des échantillons prélevés dans les puits de Koka (4.16 mg/L) et Djindjirébéri (1.65 mg/L). Deux points d'eaux seulement ont présenté une concentration optimale en ions fluorures (entre 0,5 et 1,5 mg/L). Le reste des échantillons a présenté une concentration en ions fluorures inférieure à 0,5 mg/L. Les ions fluorures dans les eaux analysées pourraient provenir de la dissolution des silicates car F^- a un rayon ionique identique à celui de l'ion OH^- et peut donc se substituer à lui dans ces minéraux (Jordana et *al* ; 2004), dans (Matini et *al*, 2009).

Celles des ions ortho phosphate se situent entre 0 et 228.4 mg/L. Les 32, % des points d'eaux étudiés ont présenté une concentration des PO_4^{3-} supérieure à la valeur limite qui est de 0,5 mg/L dont les concentrations les plus importantes ont été notées dans les forages de Koka (5.63 mg/L), Tagayè (11.03 mg/L), et Tchoumi-tchoumi (228.4mg/L).

4.2- Faciès hydrochimiques des eaux de forages et de puits

L'essentiel de nos échantillons, reportés sur la grille des faciès, correspondent à des faciès bicarbonatés calciques et bicarbonatés sodiques. Le reste est représenté par les faciès chlorurés sodiques et chlorurés calciques. Les échantillons des forages captant l'aquifère de fracture, présentent un faciès bicarbonaté calcique dominant, tandis que ceux issus des puits présentent un faciès bicarbonaté sodique dominant (fig.9).

Au total, deux grands types d'eaux se distinguent facilement (fig. 10):

1) les eaux des puits et forages situés dans la zone du substratum migmatito-gneissique de la plaine de Perma, présentent pour la plupart un faciès bicarbonaté calcique avec des concentrations relativement élevées en Ca^{2+}.

2) les eaux des zones quartzitique et schisteuse sont dominées par le faciès bicarbonaté sodique.

L'empreinte de ces roches sur les eaux apparaît donc importante à cause des solubilités élevées de certains de leurs minéraux. La dissolution peut s'expliquer par une forte production du CO_2 biogénique dans le milieu (Alassane, 2000). En effet, la Commune de Natitingou étant une zone dont les principales activités rémunératrices sont l'agriculture et l'élevage, l'activité biologique peut libérer de fortes quantités de CO_2 qui en solution dans l'eau donne de l'acide carbonique.

Hormis les deux familles d'eau citées ci-dessus, une proportion non négligeable des puits et forages situés dans la zone quartzitique, présente des faciès chloruré sodique et les faciès chloruré calcique.

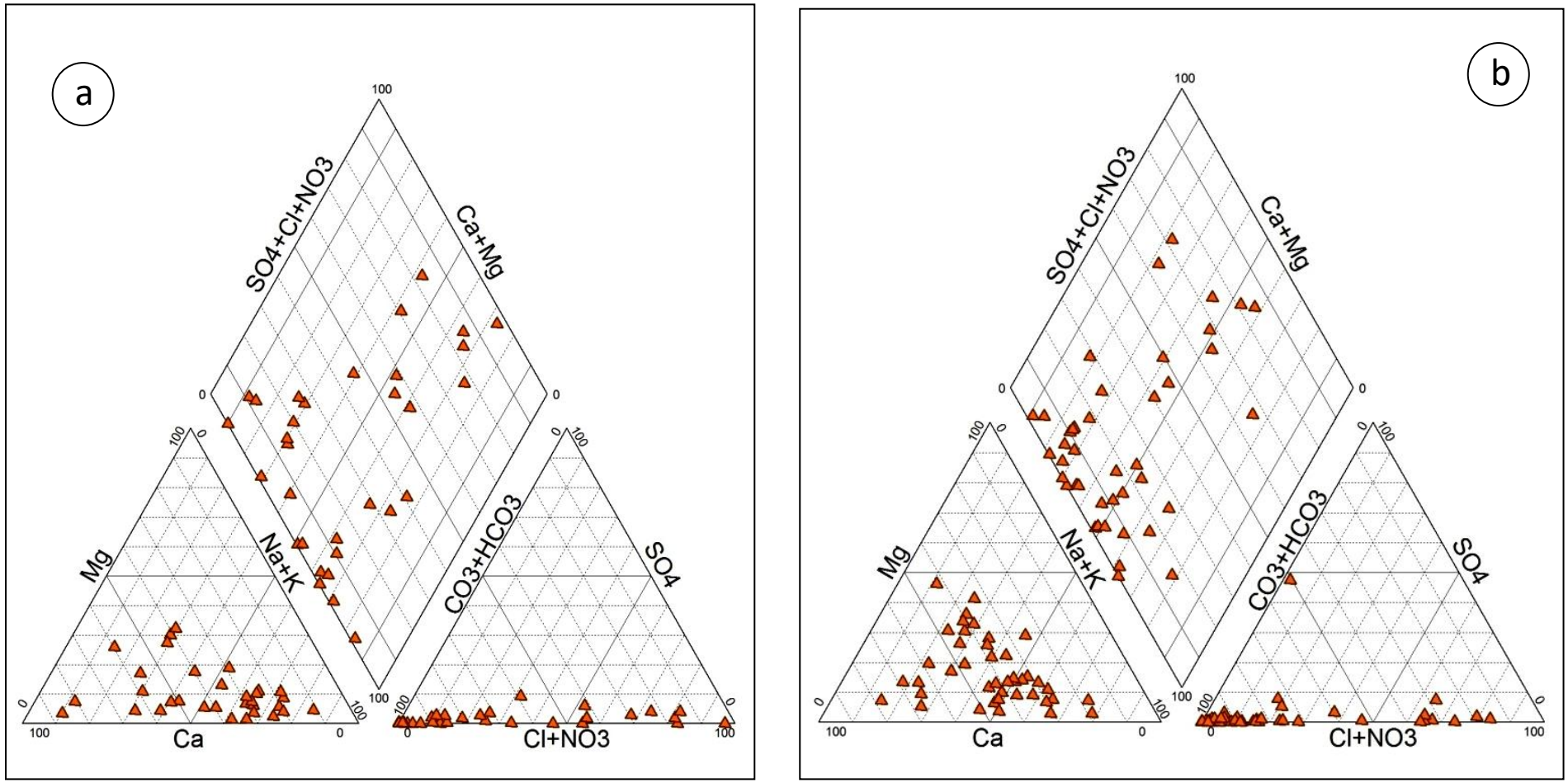

Fig.9 : Diagramme de Piper des eaux de forages (a) et diagramme de Piper des eaux de puits (b) (septembre 2009)

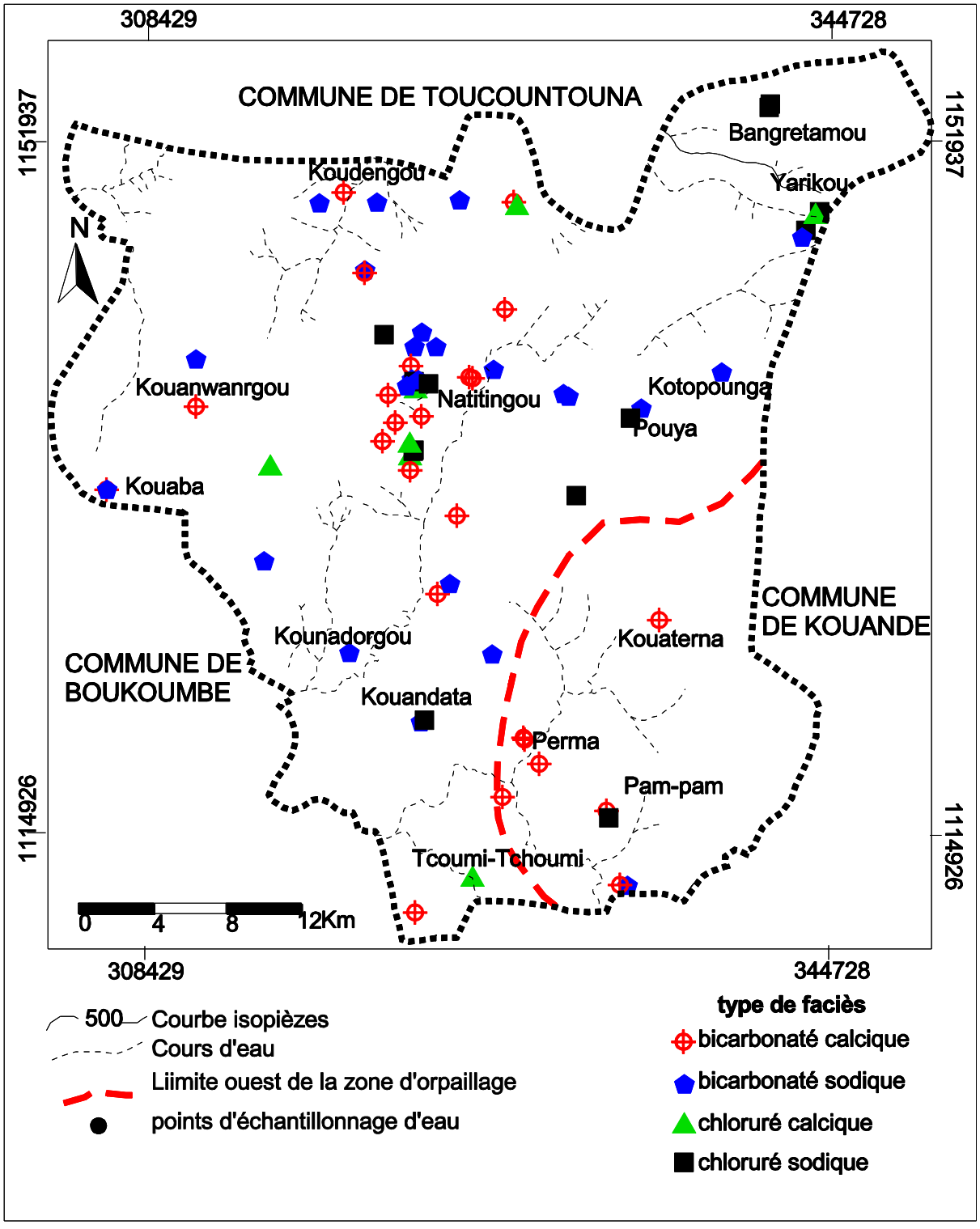

Fig.10 : **Carte de répartition spatiale des faciès hydrochimiques**

Les roches du domaine du socle cristallin de la plaine de Perma sont, selon (Kriatov et al., 1980), des roches magmatiques diversement transformées dont certaines sont datées de l'Eburnéen (1800 Ma). Elles constituent le prolongement nord des gneiss et orthogneiss de

Kara. Il s'agit des granites et granodiorites à grains moyen et fin, des diorites, des granito-gneiss, des migmatites dites de la première phase, des granites et granodiorites à grains grossiers, des pegmatoïdes et migmatites de la deuxième et troisième phases.

L'hydrolyse de telles roches riches en feldspaths alcalins et en plagioclases acides et pauvres en ferromagnésiens, (Yessoufou, 1991), pourraient expliquer que les teneurs en Ca^{2+} soient dominantes pour les cations.

4.3- Teneur en ETM des eaux et des sols

4.3.1- Teneur en ETM des eaux

Comme annoncé supra, les métaux lourds concernés par cette étude sont l'arsenic, le cadmium, le mercure et le plomb. Ces métaux ont été choisis à cause de leur toxicité élevée (tableau III).

Dix points ont été choisis pour l'analyse de métaux lourds étudiés en tenant compte des données de la carte piézométrique de la figure 17 plus loin. En effet, l'écoulement de la nappe phréatique à l'échelle de la Commune de Natitingou se fait de façon radiale, étant donnée la présence de dômes piézométriques libérant de l'eau vers les dépressions piézométriques.

La carte piézométrique de la figure 17 plus loin, présente en effet deux dômes importants qui sont situés dans les zones de Kouaba à l'Ouest et de Kotopounga à l'Est. A partir de ces dômes, la nappe s'écoule vers les dépressions piézométriques de façon radiale. Ces dépressions sont situées en ce qui concerne la zone d'étude, selon un axe NNE-SSW. Elles englobent les localités telles que Tikouati au Nord, Natitingou au centre, Kouandata, Perma, Pam-pam et Tchoumi-Tchoumi au Sud. On remarque également une ligne orientée ouest est de partage des eaux approximativement à la latitude de Kotopounga, Natitingou et Kouaba.

Elle sépare les deux dépressions décrites supra, celles de Kouaba et de Kotopounga. (Sambiénou et Yantikoua2009).

Les points d'eau dont les échantillons sont analysés ont été donc choisis au niveau des dômes et au niveau des deux dépressions. Ainsi au niveau des dômes, sur la ligne de partage des eaux, nous avons les points d'eau de Kouanwanrgou, Winkè, Pouya et Kotopounga. Deux points d'eau (Kabakoudengou et Yarikou) ont été choisis dans la dépression piézométrique du Nord tandis que Kouaterna, Kouandata, Perma et Pam-Pam ont été choisis dans la dépression piézométrique du sud.

Les résultats d'analyse de métaux lourds des échantillons d'eau consignés dans le tableau XV sont représentés par les figures 11, 12 et 15. Les cartes spatiales de teneur ces différents éléments traces métalliques sont représentées par les figures 13, 14 et 16.

Tableau XV: Résultats d'analyse de métaux lourds étudiés

Points de prélèvement	Teneurs en métaux lourds		
	Cadmium (µg/L)	Mercure (µg/L)	Plomb (mg/L)
Kabakoudengou	2.7	1.2	0.048
Yarikou	3.1	2	0.061
Kouanwanrgou	3.2	6.8	< 0.010
Winkè	2.8	2.4	0.168
Pouya	4.1	4.4	< 0.010
Kotopounga	3.9	5.2	<0.010
Kouaterna	3.9	2	<0.010
Kouandata	2.5	1.2	0.032
Perma	2	2	0.043
Pam-pam	3.2	1.6	0.063

La figure 11, montre que les concentrations du cadmium dans les échantillons analysés ont des valeurs comprises entre 2 et 4.1 µg/L. Toutes ces valeurs restent inférieures à la norme OMS de qualité de l'eau potable de cet élément qui est de 5 µg/L.

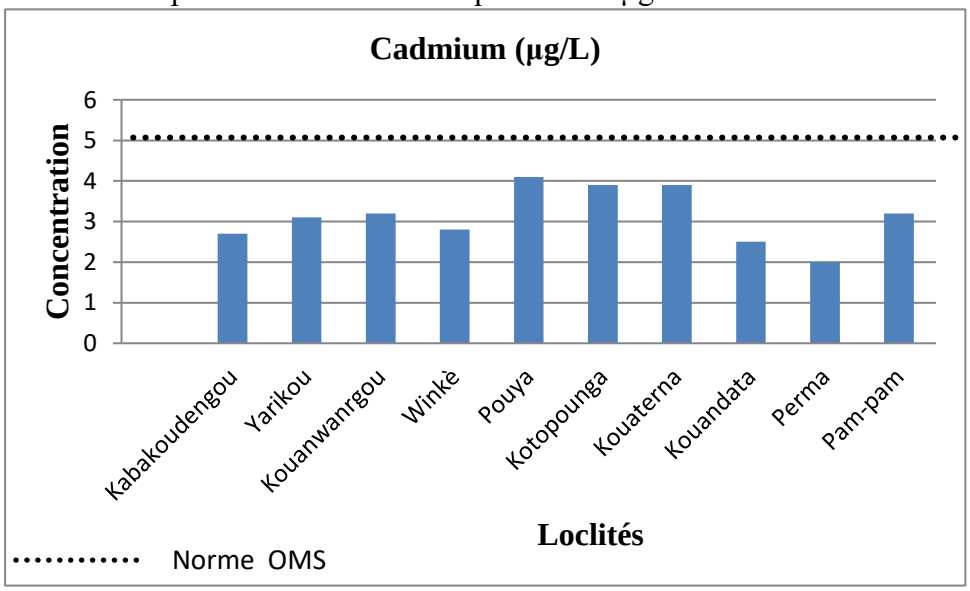

Fig.11 : **Variation spatiale de la concentration du cadmium dans les eaux**

En ce qui concerne le Plomb, les échantillons d'eau de forage de Kouanwanrgou, Pouya, Kotopounga et de Kouaterna ont présenté des valeurs inférieures 0.010 mg/L. Les échantillons restants présentent des valeurs comprises entre 0.032 et 0.168 mg/L. Les valeurs en plomb déterminées pour les forages de Yarikou (0.068 mg/L), Pam-pam (0.063 mg/L) et Winkè (0.168 mg/L) restent supérieures à la norme qui est de 0.05mg/L.

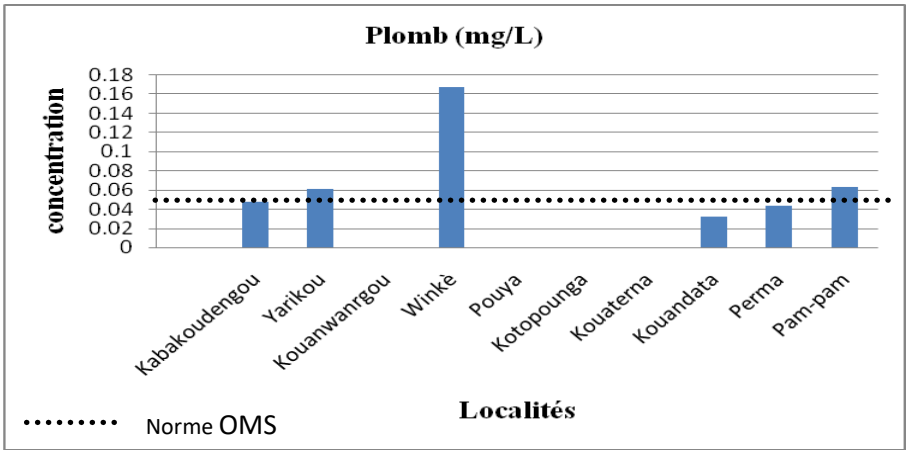

Fig.12 : **Variation spatiale de la concentration du plomb dans les eaux**

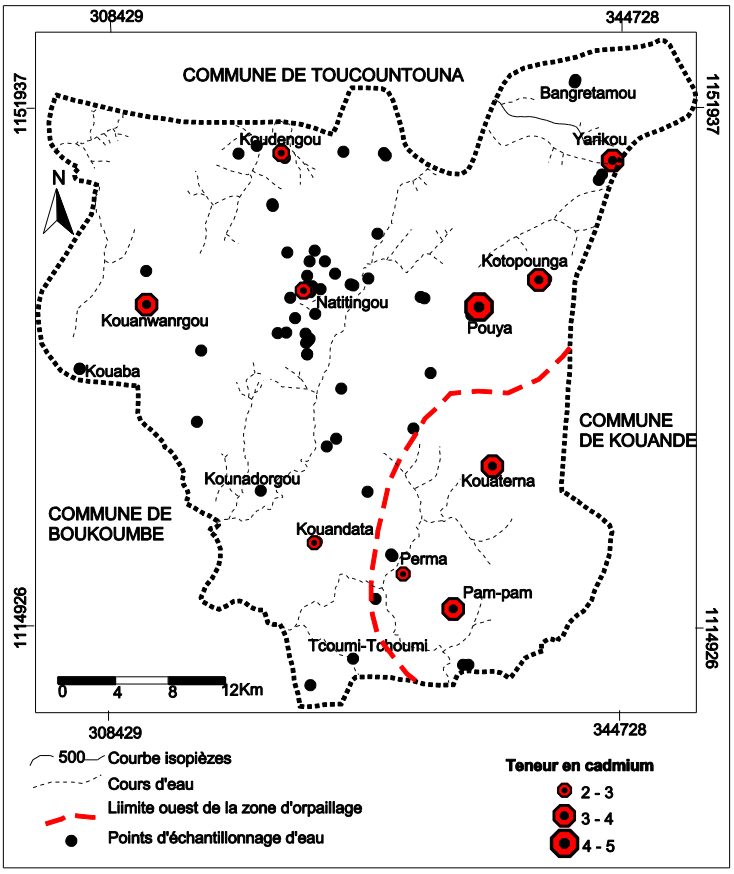

Fig. 13: **Carte de variation spatiale de la teneur en cadmium des échantillons d'eau analysés**

Le plomb tout comme d'autres métaux lourds, est présent dans les roches, et peut être diffusé avec l'érosion. Les métaux lourds en surface ne viennent cependant pas tous de la roche, puisqu'il peut y avoir cumul entre ce qui vient du sous-sol et ce qui est apporté par l'air, qui peut provenir de très loin.

Les principales sources naturelles de plomb sont l'exploitation minière (or, zinc, argent), les éruptions volcaniques etc. Il faut signaler que mis à part le site de Perma où se fait l'exploitation de l'or, le secteur d'étude dans sa grande partie ne constitue pas une zone minière et ne connaît pas d'éruptions volcaniques. Sous réserve de recherches poussées, les sources naturelles de plomb sont à minimiser dans le contexte actuel de la commune de Nattingou. Le pic observé dans la ville au niveau de Winkè pourrait avoir une origine anthropique. De même, Perma et Pam-Pam sont des localités proches du site aurifère où l'utilisation des bulldozers pour le décapage, et des motopompes (Photo N°7) pour le lavage d'or pourrait émettre le plomb à travers les gaz d'échappement.

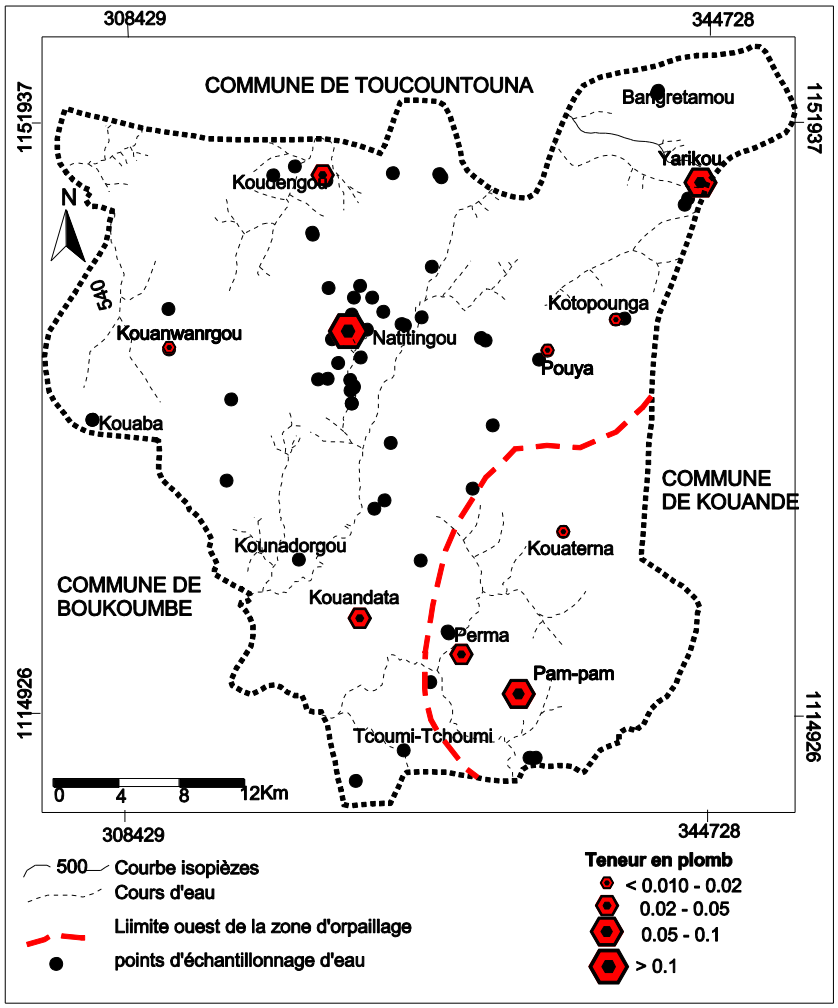

Fig. 14: **Carte de variation spatiale de la teneur en plomb des échantillons d'eau analysés**

En ce qui concerne le mercure, tous les échantillons analysés ont donné des valeurs au dessus de la norme OMS qui est fixée à 1 µg/L. Si les fortes valeurs étaient observées par exemple seulement au niveau de la zone aurifère, on pourrait peut être lier son origine à l'exploitation aurifère.

La répartition spatiale des points d'eau échantillonnés et les valeurs obtenues méritent que les origines de cet élément trace soient élucidées vu le caractère nocif de cet élément chimique pour la santé humaine.

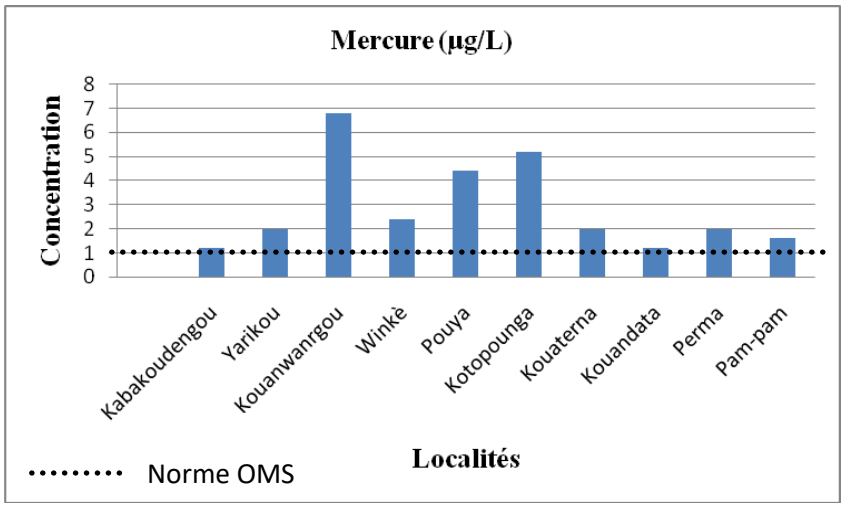

Fig.15 : **Variation de la concentration du mercure dans les eaux selon les stations**

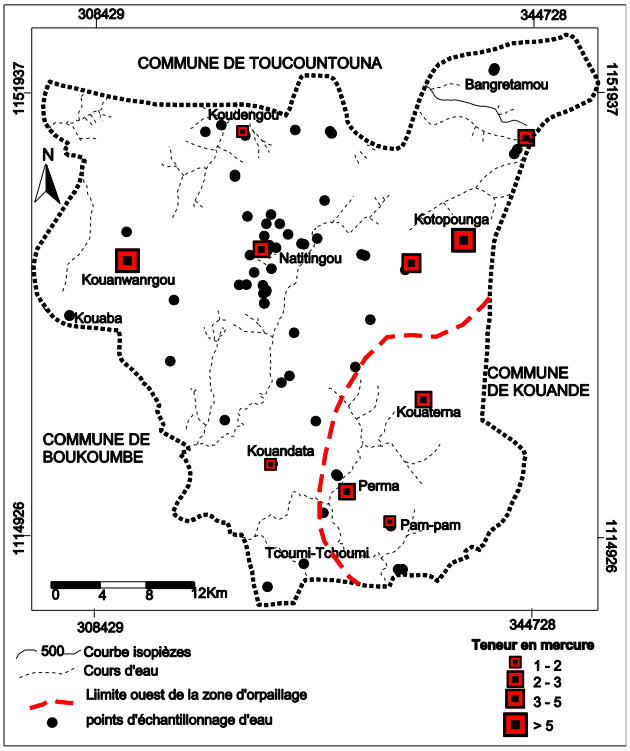

Fig. 16: **Carte de variation spatiale de la teneur en mercure des échantillons d'eau analysés**

4.3.2- Piézométrie et répartition des ETM

Comme rapporté supra, l'analyse de la carte piézométrique de la figure 17 réalisée pour le domaine d'étude, par une étude récente (Sambiénou et Yantikoua, 2009) montre que l'écoulement de la nappe phréatique se fait de façon radiale avec de la présence de deux dômes à partir desquels l'eau alimente les dépressions piézométriques occupées par les rivières Kounné et Perma. Par conséquent, les dépressions piézométriques constitueraient potentiellement les zones d'accumulation des différents métaux si la mobilité de ces derniers est liée à l'écoulement de la nappe. L'analyse de la répartition spatiale du cadmium et du plomb ne montre pas de lien clair entre celle-ci et la piézométrie. Par contre, pour ce qui concerne le mercure, les valeurs les plus élevées s'observent au niveau des dômes et des zones environnantes.

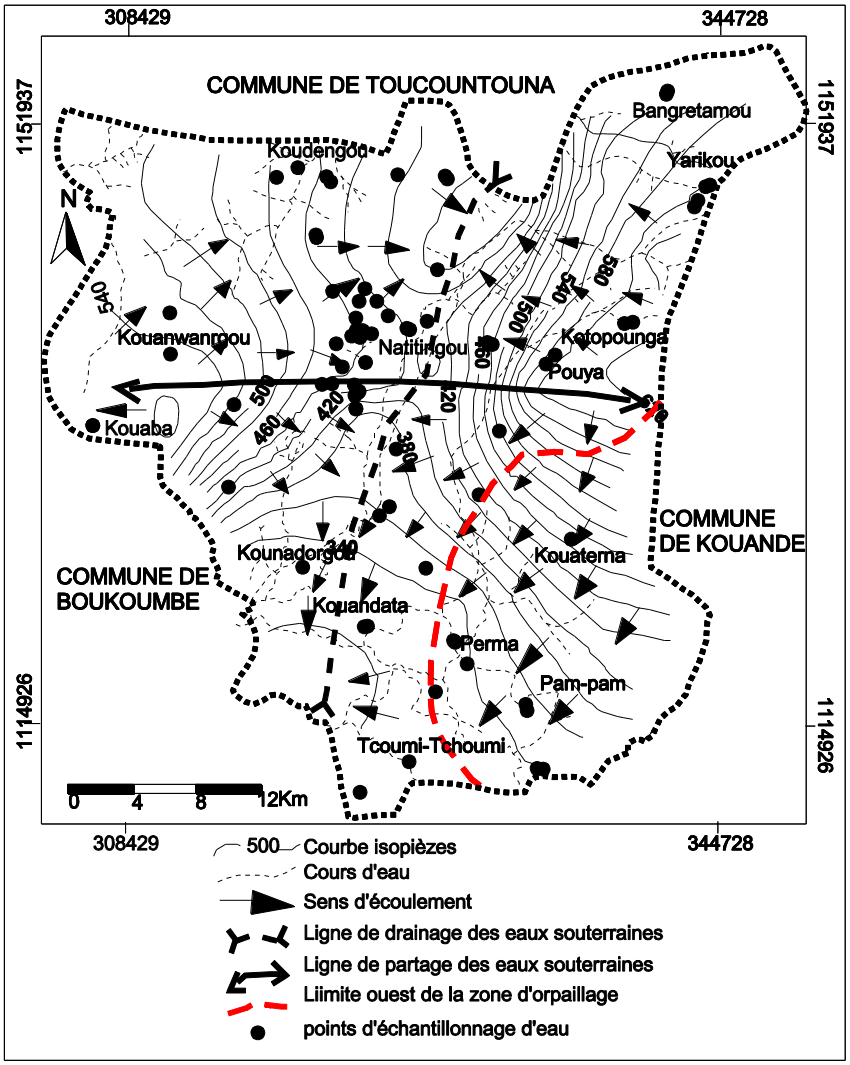

Fig. 17 : **Carte piézométrique de la zone d'étude.**
Source : (Sambiénou et Yantikoua, 2009).

4.4- Teneur en métaux lourds du sol

Si les stations de prélèvement des échantillons d'eau se répartissent sur toute l'étendue de la Commune de Natitingou, les échantillons de sol par contre ne concernent que le Périmètre minier P3, c'est à dire la portion Nord de ladite Commune. Rappelons ici que nous avons obtenu ces résultats d'analyse de sols de la société ETRUSCAN, qui a mené les travaux de prospection minière sur ce périmètre.

Les résultats d'analyse de métaux lourds des échantillons de sol montrent des concentrations assez variables d'arsenic, de plomb, de mercure et de cadmium. Les concentrations de l'arsenic dans les sols étudiés, montrent des valeurs parfois supérieures à la valeur maximale fixée par l'OMS pour les sols, qui est de 40 ppm (Fig.18). Les échantillons dont les valeurs en arsenic excèdent les 40 ppm sont pour la plupart regroupés dans la même zone (fig.19).

Selon Gaultier *et al.,* 2002, dans le cas de sols faiblement contaminés, la part des métaux endogènes, issus du fond pédogéochimique local (concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique (Baize, 1997), contribue de manière significative au stock global en ETM dans un horizon. Il serait donc indispensable que des études soient initiées pour évaluer ce fond pédogéochimique pour chaque type de sol. Ceci permettra d'apprécier d'éventuelles augmentations manifestes des teneurs en métaux et de préciser leurs origines. Une simple superposition de la projection des points d'échantillons dont les valeurs en arsenic sont supérieures à la norme OMS dans le sol avec la carte géologique (Fig.19), montre que la plupart de ceux-ci se situent sur les formations schisteuses (groupe de Kouandé) de la plaine de Toukountouna qui se prolonge jusque dans la Commune de Natitingou. Cette situation semble indiquer que la concentration de cet élément dans les sols, serait d'origine naturelle. Cet élément pourrait provenir de l'arsénopyrite qui est un sulfure accompagnant la minéralisation aurifère présent dans les formations quartzitiques de la région (Yessoufou, 1991).

Selon Charlet and Schlegel, 1999; Manceau, 1996; Duchaufour, 2001, rapportés par Fernandez-Cornudet, 2006, "les phyllosilicates que l'on retrouve essentiellement dans la fraction argileuse (<2µm) des sol, sont des silicates d'alumine organisés en feuillets formés d'un empilement successifs d'octaèdres, $Al(OOH)_6$ et de tétraèdres SiO_4. Des substitutions isomorphiques au sein de ces polyèdres se produisent et conduisent à la charge négative (charge permanente, indépendante du milieu) de la surface des argiles.

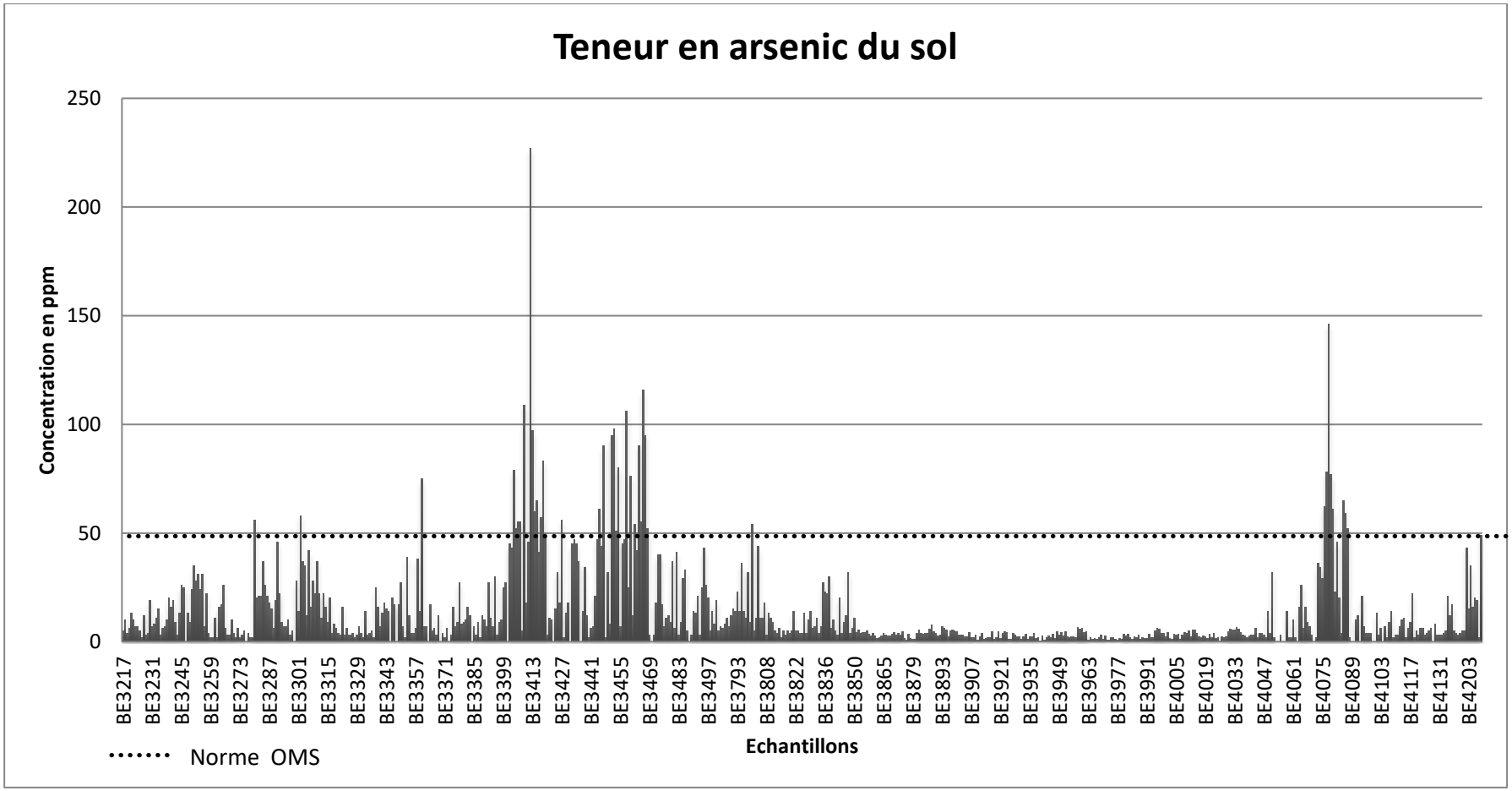

Fig. 18 : **Variation de la teneur en arsenic dans les sols selon les stations.**

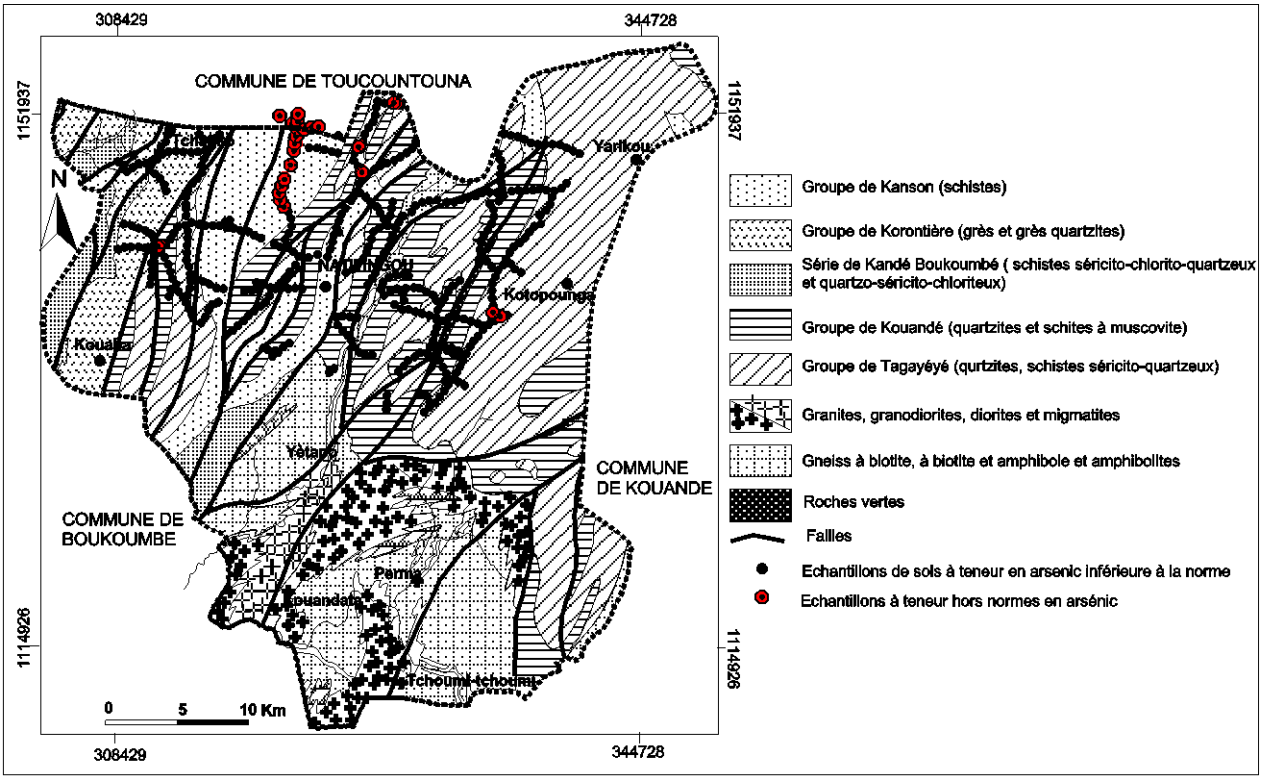

Fig. 19: **Projection sur la carte géologique des points d'échantillonnage de sols, montrant le secteur à échantillons de sols avec concentration en As hors normes OMS**

Ce déficit de charge est alors compensé par la charge des cations dans l'espace interfoliaire ou à la surface du minéral. A cette charge permanente s'ajoute une charge variable due à la présence de groupements hydroxyles sur les bordures. L'ensemble de ces groupements permettent la fixation des ETM. Ce résultat pourrait constituer une hypothèse pour expliquer les concentrations d'arsenic dans ces sols, quand on sait que l'altération des schistes donne naissance à des argiles.

Les concentrations dans les sols obtenues pour le mercure sont comparées à la norme 1ppm. Ainsi plusieurs échantillons ont présenté des valeurs inférieures à 1ppm qui constitue la valeur limite permise par la norme OMS.

Les valeurs obtenues pour le plomb sont en dessous de la valeur critique indiquée par l'OMS qui est égale à 100 ppm (Fig.20).

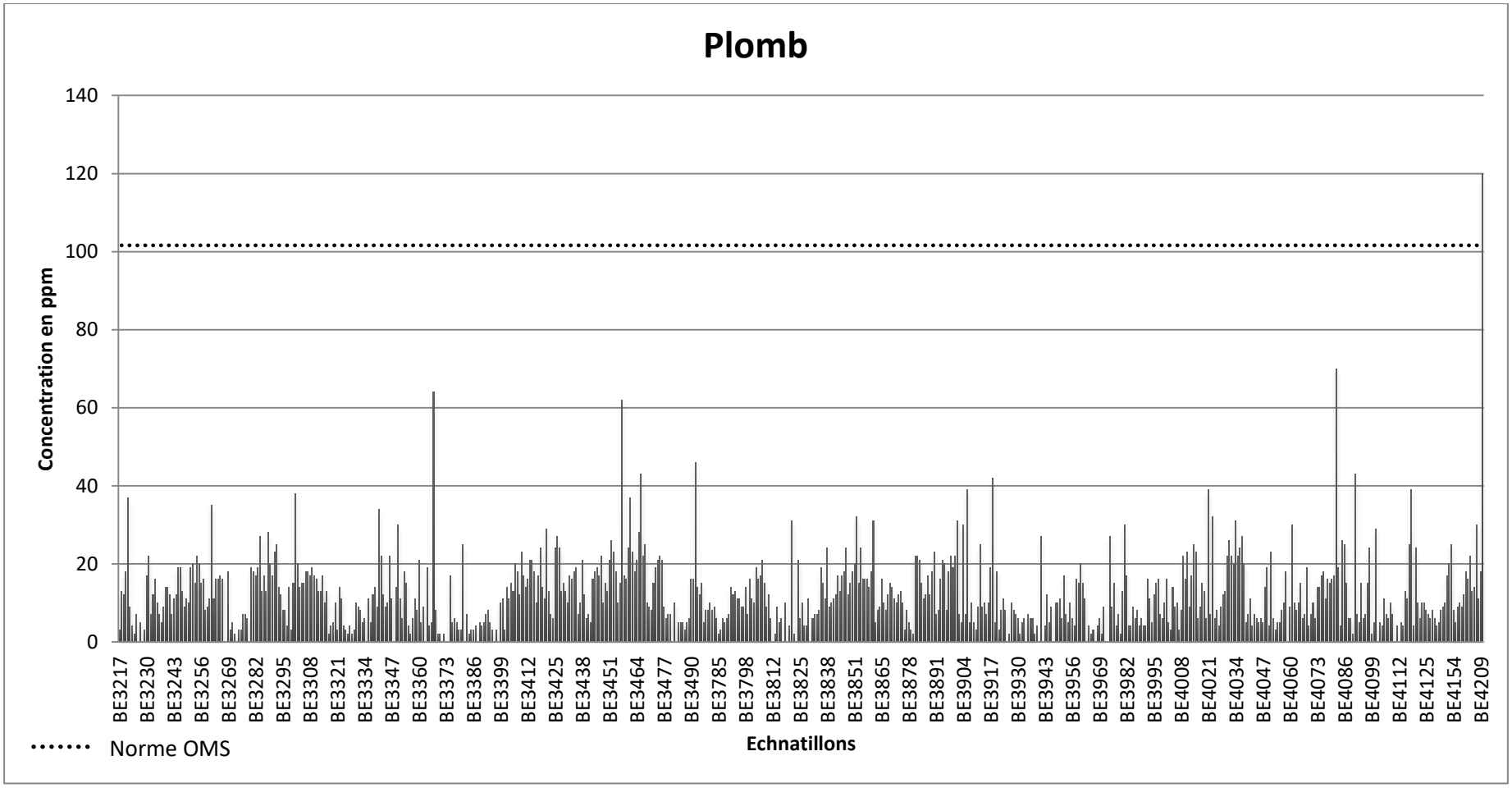

Fig. 20 : **Variation de la teneur en plomb dans les sols selon les stations**

4.5- Conclusion

Les eaux souterraines de la Commune de Natitingou, sont généralement acides de pH variant entre 4,1 et 7,3. Les conductivités de l'ensemble des échantillons analysés varient entre 40 µS/cm et 1661µS/cm. Les eaux présentent donc des minéralisations variables (minéralisations faibles à minéralisations élevées). Les principaux faciès hydrochimiques identifiés sont représentés par des faciès bicarbonatés calciques et bicarbonatés sodiques. On note également des faciès chlorurés calciques et chlorurés sodiques.

Les résultats d'analyse de métaux lourds dans les échantillons d'eau montrent qu'en ce qui concerne le cadmium, les valeurs restent inférieures à la norme OMS de qualité de l'eau potable (5 µg/L) et quant au plomb, quelques points ont présenté des valeurs supérieures à cette norme (0,05 mg/L). En ce qui concerne le mercure, tous les échantillons analysés ont donné des valeurs au dessus de la norme OMS (1 µg/L). Pour les sols, les résultats montrent des concentrations assez variables de Plomb mais qui restent, dans l'ensemble des échantillons analysés inférieures à la norme OMS fixée à 100 ppm. Elles sont également variables pour l'Arsenic et le mercure dépassant parfois les normes OMS fixées respectivement à 40 ppm et 1ppm.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La présente étude a montré que les eaux souterraines de la commune de Natitingou, présentent des caractéristiques assez variées.

En tenant compte des différentes zones hydrogéologiques identifiées, on remarque que le pH des eaux de la zone à réservoir migmatito-gneissique de la plaine de Perma tendent vers la neutralité (pH= 7) tandis que celles des zones à réservoirs schisteux et quartzitique ont un pH acide (parfois inférieur à 4,5) avec une agressivité remarquable pour les eaux de la zone quartzitique.

Les eaux de la zone hydrogéologique à réservoir métamorphique de Perma ont des conductivités variables, comprises entre 69.4µS/cm et 1661µS/cm. Ainsi, les eaux de certains puits sont très faiblement minéralisées (<100 µS/cm) et d'autres présentent les minéralisations importantes à élevées (> 1000 µS/cm).

Les valeurs des TDS des eaux étudiées sont très variables 39 mg/L à 1165 mg/L, mais restent tout de même élevés pour les eaux du réservoir migmatito-gnessique de la plaine de Perma supérieur à 1000. Des corrélations ont été notées entre certains paramètres physico-chimiques tels que le sodium et le potassium (r = 0.64), les nitrates et les chlorures (r = 0.81), le calcium et les bicarbonates.

Pour l'essentiel les échantillons d'eau étudiés, présentent des faciès bicarbonatés calciques et bicarbonatés sodiques. Le reste affiche des faciès chloruré sodique et chloruré calcique.

L'analyse des métaux lourds des eaux montre pour le cadmium, des valeurs qui restent inférieures à la norme OMS de qualité de l'eau potable (5 µg/L). Quelques points ont présenté des valeurs supérieures à cette norme pour le plomb. Quant au mercure, tous les échantillons analysés ont donné des valeurs au dessus de la norme OMS. Ce cas mérite d'être élucidé par des recherches sur les origines de la concentration de cet élément trace, dans les eaux dans la zone d'étude, vu son caractère très nocif pour la santé humaine.

Pour les sols, les résultats d'analyse de métaux lourds des échantillons montrent des concentrations assez variables de Plomb mais qui restent, dans l'ensemble des échantillons analysés inférieures à la norme OMS fixée à 100 ppm. Elles sont également variables pour l'arsenic et le mercure dépassant parfois les normes OMS fixées respectivement à 40 ppm et 1ppm.

Pour mieux comprendre le comportement de certains polluants dans les eaux souterraines et les sols de notre zone d'étude, il importe de :

- construire un modèle de transfert des ETM entre le sol et la nappe phréatique ;
- mettre également au point un modèle géochimique de spéciation afin de déterminer, notamment, les phases minérales contenant les polluants métalliques ;

Ces travaux sont prévus pour être menés dans le cadre d'une thèse de doctorat qui constituera la suite de ce mémoire.

BIBLIOGRAPHIE

AFRIQUE CONSEIL (2006)- Monographie de la Commune de Natitingou. 85p.

AHISSOU S. R. et GOUDALOU N. (2004) – Potentialités hydrogéologiques en relation avec les ensembles pétrographiques et structuraux du département de l'Atacora. Mém. de Maîtrise, 54p. FAST/UAC, Bénin.

AICARD P.(1957)- Le précambrien du Togo et du Nord Ouest du Dahomey. Bulletin de la Direction fédérale des Mines et de Géologie de l'Afrique Occidentale Française, N°23, Dakar.

ALASSANE A. (2000) - Contribution à l'étude hydrochimique de l'aquifère du Continental Terminal du plateau de Sakété dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin. Mémoire de DEA, Université Cheik Anta Diop de Dakar, 81p.

AUBERTIN M., BUISSIERE B., BERNIER L.(2002)- Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur cédérom – Presses internationales polytechniques.

BAIZE D. (1997)- Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA, Editions, Paris 408p.

BLANCHARD C.(2000)- Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France 301p.

BONHOMME M.(1962)- Contribution à l'étude géochronologique de la plate forme de l'Ouest africain. Ann. Fac. Sc. Université de Clermont-Fernand, Géol. Minéral. N°5, France.

BOUKARI M. (1982) - Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle de l'Afrique intertropicale : Hydrogéologie de la région de Dassa-Zoumè (Bénin). Thèse de Doctorat en Géologie appliquée mention hydrogéologie, Université de Dakar, 131p.

BOURG A. C. M. (1983)- Modélisation du comportement des métaux traces à l'interface solide-liquide d ans les systèmes aquatiques, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1. France, 171p.

BOURG A. C. M. (1988)- Metal in aquatic and terrestrial systems : sorption, speciation, and mobilization. In W. Salmons, U. Forstener (éditeur), Chimistry and biology of solide waste, pp 3-30. Springer verlag, New York.

BOURIE G.(1978)- Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux granites vosges et de la Margeride. Sciences géologiques, Mémoire WLP, N°52 Strasbourg, France.

BREDA (1982)- Etude de la cartographie géologique et prospection minière de reconnaissance au Nord du 11ème parallèle. Projet FED N°4105- 011-13-20. République Populaire du Bénin// Institut de Recherche BREDA. Dim géominéral Italie.

BREDA (1985)- Etude de la cartographie géologique et prospection minière de reconnaissance au Sud du 9ème parallèle. Projet FED N°5100- 011-13-15. République Populaire du Bénin// Institut de Recherche BREDA. Dim géominéral Italie.

BRGM/RP-54713-FR (2006)- Pollution des sols en contexte minier : démarche et choix techniques d'évaluation des risques. Rapport final, 71p.

BRIL H & FLOC'H J. P. (2001) - Le devenir des métaux provenant des anciennes mines ; l'exemple du massif centrale français. Article paru dans la revue "Géologues" publiée par l'Union française des Géologues, n° 130/131, pp 233 – 241.

CHARLET L. & SCHLEGEL M. (1999)- La capacité d'échange des sols. Structures et charges à l'interface eau-particule. Comptes rendus de l'académie d'agriculture France, 2, 7-24.

DERE C. (2006) - Mobilité et redistribution à long terme des Eléments Traces Métalliques exogènes dans les sols : application à des luvisols pollués par 100ans d'épandage d'eaux usées brutes dans la plaine de Pierrlaye. Thèse de Doctorat en science de l'environnement à l'institut national d'Agronomie Paris-Grillon, 103p.

DESCHAMPS T., BENZAAZOUA M., BUISSIERE B., BELEM T. ET MBONIMPA M. (2006)- Mécanisme de rétention des métaux lourds en phase solide : cas de la stabilisation des sols contaminés et des déchets industriels. Vertigo- la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol 7, N°2.

DUCHAUFOUR P.(2001)- Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement. Dunod, Paris, 331p.

DUFFUS J. H. (2002)- "Heavy metals". A meaningless term? Pure and Applied Chemistry, 74, 793-807.

FAILLAT J. P. & DROGUE C. (1993) - Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. Laboratoire d'Hydrogéologie, URA 1359 du CNRS, ISAMOR, Technopôle Brest-lroise, 29280 Brest Plouzanê, France

FERNANDEZ-CORNUDET C. (2006) - Devenir du Zn, Pb et Cd issus de retombées atmosphériques dans les sols, à différentes échelles d'étude. Influence de l'usage des sols sur la distribution et la mobilité des métaux. Thèse de Doctorat en Environnement et Agronomie ; Institut National d'Agronomie Paris-Grignon, 171p.

FORSTER S. S. D.(1995)- Groundwater for development on overview of quality constraints. In H. Nash & G. J. H. Mc call (eds), groundwater quality. 17th special Report, London United Chapman and Hall 1-3.

GAULTIER J. P., LEYDECKER J.P., ISAMBERT M., NAHMANI J. & VAN Oort F. (2002)- Mise en place des bases de données géoréférencées pour l'étude du devenir et de l'influence des métaux traces dans les sols in les éléments métalliques dans les sols-approches fonctionnelles et spatiales (eds D. Baize et M. Tercé), pp 299-313. INRA-éditions Versailles.

GODIN P. M., FEINBERG M.H. & DUCAUSE C. J.(1985)- Modeling of soil contamination by airborne lead and cadmium. Around Several Emission Sources. Environ. Pollut, 10, 97-114.

GOUZY A. (2008) - La connaissance des éléments traces métalliques : un défi pour la gestion de l'environnement. Air pur N°75 deuxième semestre.

GUEDENON P. (2009) - Pollution des écosystèmes par les métaux toxiques : cas du fleuve Ouémé et du lac Nokoué. Mémoire de DEA en Environnement, Santé et Développement, Université d'Abomey Calavi, 95p.

GUILLAUME C. (1997) - Hydrogéochimie d'eaux souterraines dans la ceinture métasédimentaire centrale de la province géologique du Grenville, Quebec. Mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences de la Terre.

HOUNDONOUGBO P.C. (2006) - Les impacts environnementaux de l'exploitation de l'or de Perma. Mémoire de DESS en Management et Environnemental et Qualité des eaux, Université d'Abomey Calavi, 81p.

JAIN P., SHARMA J.D., SOHU D. & SHARMA P.(2005)- Chemical analysis of drinking water of villages of sanganer Tchsil, Jaipur District. Int. J. Environ Sci. tech, Vol 2. N04 pp 373-379.

JORDANA et al (2004)- Natural groundwater quality and health. Geologica, Acta, Vol 2, N°2, 175-188.

KIROV M. (1981)- Rapport des travaux de recherche géologiques dans la zone de l'Atacora. Or 1977- 1981. Recherches Minières au Bénin. Ben/76/004. Cotonou.

KRIATOV B. M., BITERMAN I. M. et al (1981)- La Constitution et les substances utiles du territoire de la République Populaire du Bénin entre les 10ème et 11ème parallèle de latitude Nord. Rapport du levé da la prospection géologique à l'échelle de 1/200 000 effectué en 1977-1980//vsesojuznoe exportno importno Objedinenie techno export : Moscou.

LASSABATERE L. (2002) - Modification du transfert de trois métaux lourds (Zn, Pb et Cd) dans un sol issu d'un dépôt fluvio-glaciaire carbonaté par l'introduction de géotextiles. Thèse de Doctorat Ph.D de Génie civil, Université Laval (Québec), 224p.

Le BARBE L. (1993) - Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Rapport du service de l'Hydrologie, 470p

LELONG F., DURAND P., VANNIER C., GILLET B. & ROUILLER J. (1989)- Importance rétention des ions sulfates dans les sols granitiques acides en région de moyenne montagne (Mont Lozère) : relation générale avec le pouvoir tampon des sols. C. R. acad. Sci Paris 309(II), 1991-1996.

LIONS J. (2004)- Etude Hydrogéochimique de la mobilité de polluants inorganiques dans les sédiments de curage mis en dépôt : expérimentations, études in situ et modélisation, Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France 248p.

LOUIS JEAN J. (2009)- Etude de faisabilité de l'aménagement hydro agricole de la plaine de Lhomond dans la 11ème section communale d'Aquin : zone Frangipagne. Mémoire de fin d'études universitaires pour l'obtention du diplôme d'ingénieur-Agronome. Université d'Etat d'Haïti,

MAIRIE DE NATITINGOU (2005)- Natitingou, la Commune de montagnes et des tatas 15p.

MANCEAU A., BOISSET M.C., SARRET J. L., HAZEMANN J.L., MENCH M., CAMBRIER P. & PROOT R. (1996)- Direct determination in contaminated soils by EXAFS spectroscopy-Environ.Sci Technol 30, 1540-1552.

MATINI L, MOUTOU J.M. et KONGO-MANTONO M.S. (2009) - Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. Article paru dans Afrique Science 05(1) (2009) 82 – 98 ISSN 1813-548X.

MIQUEL G. (2001)- Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport N°2979 Assemblée Nationale de la France , 365p.

OMS (2000)- Directives de qualité pour l'eau de boisson. 2nde éd, Vol 2. Critère d'hygiène et documentation à l'appui, 1050p.

PETROV M. MIKHILEV L. & KOUKOUCHKINE Y. (1984)- Chimie minérale, édition Mir 463p.

PILI E. & RENARD F. (2009)- Comprendre les transferts des contaminants dans les sols et protéger nos ressources en eau. Département Analyse, surveillance environnementale. Direction des applications militaires CEA N°57 centre DAM-ile de France.

POUGNET (1957)- le précambrien du Dahomey. Thèse de doctorat ès-sciences. Bulletin N°22 Direction Fédérale des Mines et de la Géologie//Dakar

SAMAKE H.(2002)- Analyse physico-chimique et bactériologique au LNS des eaux de consommation de la ville de BAMAKO durant la période 2000 et 2001, Thèse de doctorat en pharmacie, Université de BAMAKO. 77p

SAMBIENOU G.W &YANTIKOUA A.B. K. (2009) - Hydrogéochimie et pollution des eaux souterraines dans la commune de Natitingou. Mémoire de maîtrise en Géologie fondamentale et appliquée, Université d'Abomey Calavi, 49 p.

SARAZIN G., FOUILLAC C. & MICHARD G. (1976)- Etude de l'acquisition d'éléments dissous par les eaux de lessivage des roches granitiques sous climat tempéré. Géochim. Cosmochim. Acta 40, 1481-1486.

SIRVEN J. (2006) - Détection des métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par Laser. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, 252p.

TOHNGODO B. (2008) - Evaluation du risque écotoxicologique des éléments en traces minéraux sur un site aurifère de l'Afrique de l'Ouest et leurs impacts sur les ressources en eau : Cas du périmètre aurifère de Perma (Nord-Ouest de la République du Bénin). Mémoire de DEA en Chimie environnementale, Université d'Abomey Calavi, 109p.

VINCENT P.(1962)- Rapport d'ensemble sur les prospections et les recherches pour or, effectuées par le Service des Mines dans le Nord Dahomey de 1935 à 1942. Recherche or 115p.

YESSOUFOU S. (1991) - Structure géologique et composition minéralogique du gisement aurifère de Perma (Bénin). Thèse de doctorat (Ph.D) en Géologie et minéralogie, Université de l'amitié des peuples –Patrice Lumumba, 236p.

YEVIDE H. (1995) - Contribution à l'étude de minéralisation titanifère au Bénin : Cas du secteur de Djidja (Abomey). Diplôme de troisième cycle de maîtrise Interuniversitaire en Géologie des terrains superficiels à l'Université de Liège. Belgique, 86p.

ANNEXES

Annexe1 : Précipitations moyennes mensuelles à la station synoptique de Natitingou.

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1978	132,7	146,6	147,2	131	142,8	102,7	103	98,9	110,1	112,4	112,4	114,9
1979	121,1	120	151,3	152,4	139,1	104,2	101,7	100,2	115,1	113,2	113,2	135,4
1980	126,2	136	160,4	160,3	142,6	106,8	100,3	104	105	109,1	109,1	111,9
1981	134,2	147,5	165,5	158,1	139,6	96,9	94,5	106,1	114,8	131,9	131,9	131,1
1982	135,8	136	154,1	146,3	134	106,8	94,1	107,2	110,2	118,2	118,2	112,8
1983	149,5	136,8	173,3	160,2	149,6	112,6	104,8	104,1	129	116,7	116,7	119,1
1984	135	139	164	153	143	114	108	110	131	134	134	126
1985	120	110	149	144	141	105	103	101	118	129	129	115
1986	122	127	150	128	143	89	92	89	109	113	113	109
1987	116	115	130	134	138	122	110	109	114	106	106	94
1988	98	106	132	131	141	104	95	103	122	108	108	94
1989	119,7	99	128	141	143	106	101	112	111	109	109	97
1990	103	105	128	150,1	137	100,6	112,7	105,9	117	111,2	111,2	120,5
1991	145,3	112,4	158,8	136,6	122,2	101,8	97,3	107,6	111,9	120,3	120,3	137
1992	103,7	106,9	134,4	129,1	129,8	109,8	100,5	102,6	117,1	101,3	101,3	113
1993	97,2	105,1	132,5	144,5	142,9	106,9	109	105,1	114,6	112,7	112,7	110,1
1994	99,9	100,4	137,8	137,3	133	107,3	97,8	104	113,6	106,6	106,6	95,1
1995	97,1	100,3	138,2	138,3	136,4	111,4	104	107,6	117,7	104,3	104,3	102,5
1996	102,9	116,7	138,8	141	139,9	109	106,8	102,8	113,6	102,1	102,1	95,8
1997	99,1	96,2	129,7	138	132,1	106,7	106,9	109,2	126,9	125,5	125,5	134,2
1998	164,3	170,4	201,5	176,3	146,1	107,1	100,2	102,6	124,4	143,4	143,4	129,7
1999	148,7	148,7	182,8	162,1	157,1	107,8	98,1	103,7	118,9	118,7	118,7	114,9
2000	129,2	142,4	160,6	159,1	160,6	112,8	107,4	109,6	121,6	127,9	127,9	138,1
2001	143,1	157,2	179,6	176,3	155,3	113,5	98,2	109,7	132,8	137	137	147,8
2002	153,5	150,5	169	160,2	151,1	112,5	112,9	120,1	118,3	127,6	127,6	144,7
2003	148,1	147,7	123,1	144	121,6	100,1	108,3	111,3	133,9	122,5	122,5	137,2
2004	136,9	146	179	154,8	129,3	115,6	122,1	110,2	126	119,6	119,6	123,9
2005	140,6	140,7	161,1	166,1	147,3	110,5	101,1	111,1	118,5	126,4	126,4	141,1
2006	135,2	136,9	158,1	158,7	132,4	116,8	109	105,1	120,9	125,1	125,1	130,4
2007	141,2	140,1	163,7	136,8	136,3	118,8	107,2	117,4	122,3	129,6	129,6	125,4
2008	147,7	155,8	164,2	154,6	140	108,9	104,4	100,7	121,8	126,7	126,7	143,9

Annexe2 : Températures moyennes mensuelles des minimales de 1979-2008 à la station synoptique de Natitingou.

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1979	19,9	19,7	23,7	23,6	22,8	21,4	20,9	21,4	20,2	20,5	19,2	18,4
1980	20,4	21,8	22,8	24,1	22,9	21,8	21,2	20,6	20,4	20,4	19	17,3
1981	18,4	21	23,2	23,6	22,3	21,6	20,7	20,7	20,4	20,3	18,2	18,4
1982	18,1	21,3	22,8	23,7	22,6	21,8	21,1	21	20,9	20,4	18	18,6
1983	17,5	22	23,4	24,5	23,2	22,2	21,3	21,3	20,9	20	18,7	19,4
1984	19	20,1	23	23,2	22,6	22	20,9	20,9	20,6	20,7	19,5	18,5
1985	20,3	20,8	24,8	23,6	22,9	21,8	20,6	20,4	19,8	19,7	18,9	18,3
1986	18,1	21	23,1	23,7	22,9	21,5	20,7	20,4	19,9	19,8	17,9	17,6
1987	19,6	21,3	23,3	24,5	23,9	21	21,8	21,5	21,1	20,8	18,3	19,1
1988	19,9	21,5	24,4	23,8	23,6	21,9	21,1	20,7	20,9	19,7	19,1	18,8
1989	18,5	20,3	22	23,7	22,8	20,8	20,4	20,9	20,3	19,4		19,1
1990	19,7	20,6	22,9	23,8	22,8	22	20,8	21,1	21	20,9	20,9	19,6
1991	20,3	21,8	23,3	23,5	22,8	21,9	21,1	21,1	20,8	20,2	17,7	18,6
1992	18,3	21	23,4	23,8	22,6	21,1	20,9	20,6	20,2	20,1	18,8	18,2
1993	18,2	20,9	22,3	24,1	23,1	21,7	21,1	20,9	20?4	20,8	20,3	19,8
1994	19,6	21,2	23,8	23,4	22,1	21,6	21,3	21,2	21,2	20,7	17,9	18,9
1995	18,9	20,5	23,2	23,9	22,8	22,2	21,2	20,6	20,3	20,3	18,2	18,8
1996	18,4	30,7	24	24	23	21,8	21,3	21,3	20,9	20,8	17,6	18,4
1997	19,8	21,1	23,2	23,5	22	21,6	21,1	21,1	21,3	21,5	19,2	19,1
1998	19,8	22,6	23,8	25,6	24	21,9	21,1	21,4	21,3	21,3	19	19,4
1999	19,8	21,2	25,1	23,7	23	22,4	21,4	21,2	20,5	20,3	19,2	19,3
2000	21,4	20,1	23,7	24,7	23,8	21,7	21,5	20,8	21,2	20,6	18,5	18,7
2001	18,8	20,8	22,9	24,8	23,1	21,9	21,2	21,4	20,9	20,5	19,5	20,1
2002	19,9	21	24,1	24,5	23,3	21,3	22,1	21,1	20,6	20,6	19,2	19,3
2003	20	22,8	23,5	23,5	23,4	21,8	21,3	21,5	20,6	21,7	19,7	18,9
2004	20,3	21,8	24,5	24,5	22,7	21,6	21,5	21,6	21	21,4	20,3	18,7
2005	19,3	23,7	25,1	25,1	23,2	22,3	21,8	21,4	21,3	20,6	19,2	19,5
2006	20,8	21,9	24,3	24,8	22,7	22,9	22,3	22,1	20,8	21,4	18,1	18,4
2007	19,3	21,5	23,9	23,8	23	22,2	21,8	21,2	21,2	21,2	19,9	19,1
2008	17,8	21,1	22,9	24,2	22,7	20,9	21,2	21,3	21	21,6	18,2	19,4

Annexe 2 bis: Températures moyennes mensuelles des maximales de 1979-2008 à la station synoptique de Natitingou.

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1979	35,7	37,6	37,7	36,9	33,6	30,6	29,8	30,2	31,2	33	34,3	33,9
1980	36,4	37,4	38,4	38	34,8	31,3	29,6	28,9	31,2	32	33,7	33,6
1981	34,8	37,8	37,9	36,2	32,8	32,4	29,5	29,1	31,1	33,2	34,8	36,6
1982	34,9	36,1	36,6	35,4	32,5	31	30,2	29,3	31,1	31,5	33,8	34,4
1983	31,4	37,7	38,3	38,3	34,9	31,2	30,1	30,2	30,6	34,6	36	35,7
1984	34,9	36,6	37,4	35	33,8	32,4	31	30,8	29,9	32,1	34,8	33,1
1985	35,2	35	37	34,7	33,7	31,6	29,2	29,5	30,3	34,2	36	32,8
1986	34,7	37,6	37,1	35	34,1	31,6	28,7	29,8	29,4	32,4	32,7	32,2
1987	35,1	37,4	36,9	38,1	35,6	31,8	31,4	30,1	31,3	32,4	35,9	34,4
1988	34,2	37,1	38,5	35,5	35	30,8	28,8	28,5	30	34,2	35,7	33,4
1989	33	35	36,6	37,1	35	31,6	29,3	29,1	31	32,3	35,6	33,6
1990	35	36,1	38,3	36,7	33,8	32,8	29,3	30,2	31,1	33,5	35,7	35,2
1991	35,4	37,9	33,8	35,7	32,4	31,2	29	29,2	31,7	31,8	34,2	34
1992	33,2	36,7	38,3	36	33	31,8	29	28,8	30,7	32,7	33,3	34,8
1993	34,1	36,7	36,5	37,9	34,2	32	30,2	29,9	30,6	32,6	35,2	34,8
1994	34	36,8	38	35,7	33	31,5	29,6	28,7	30,5	31,9	34,6	34
1995	33,9	36,1	38,2	36,5	34,6	32,4	30,3	29,6	31,1	32,9	34,8	35?4
1996	36,4	38	38,4	36,4	33,9	31,3	29,6	29,1	29,9	30,9	33,9	35,2
1997	35,4	34,9	36,2	34,8	32,5	30,2	29,2	29,7	30,9	32,9	34,7	34,8
1998	34,5	37,4	37,7	37,5	33,4	30,8	29,5	28,5	30,2	32,3	35,6	34,8
1999	35,2	35,6	37,6	36,1	34,4	32,8	29,3	28,4	29,9	32,2	35,5	34,6
2000	35,2	33,9	37,4	36,9	34,9	31,6	29,7	29	30,5	32,2	35,1	34,5
2001	34,7	35,7	38,6	36,6	33	31,4	29,6	28,6	30,3	34,1	36,1	36,1
2002	33,3	36,6	37,9	35,6	34,6	32,3	30,2	29,6	30,9	32	35,3	35,7
2003	35,5	37,7	37,6	35,3	34,2	30,9	29,6	29,4	30,8	33,3	34,5	34,8
2004	34,9	36,4	37,6	35,8	32,8	30,9	29,8	29,9	31,2	33,6	33,9	36,2
2005	33,9	37,6	38,5	37,2	33,8	31,4	30	28,7	31,1	33,1	36,5	36,5
2006	37	37,3	38,6	38,2	33,5	32,8	31	29,7	30,3	32,9	35,1	35,4
2007	33,3	37,7	38,9	34,8	33,1	31,8	30	28,8	31	33,1	35,3	35,2
2008	33,1	36,9	38,6	37,8	33,7	32,3	29,9	29,4	30,3	33,2	36,3	36,2

Annexe 3 : Évapotranspiration potentielle de 1979-2008 à la station synoptique de Natitingou.

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1978	132,7	146,6	147,2	131	142,8	102,7	103	98,9	110,1	112,4	112,4	114,9
1979	121,1	120	151,3	152,4	139,1	104,2	101,7	100,2	115,1	113,2	113,2	135,4
1980	126,2	136	160,4	160,3	142,6	106,8	100,3	104	105	109,1	109,1	111,9
1981	134,2	147,5	165,5	158,1	139,6	96,9	94,5	106,1	114,8	131,9	131,9	131,1
1982	135,8	136	154,1	146,3	134	106,8	94,1	107,2	110,2	118,2	118,2	112,8
1983	149,5	136,8	173,3	160,2	149,6	112,6	104,8	104,1	129	116,7	116,7	119,1
1984	135	139	164	153	143	114	108	110	131	134	134	126
1985	120	110	149	144	141	105	103	101	118	129	129	115
1986	122	127	150	128	143	89	92	89	109	113	113	109
1987	116	115	130	134	138	122	110	109	114	106	106	94
1988	98	106	132	131	141	104	95	103	122	108	108	94
1989	119,7	99	128	141	143	106	101	112	111	109	109	97
1990	103	105	128	150,1	137	100,6	112,7	105,9	117	111,2	111,2	120,5
1991	145,3	112,4	158,8	136,6	122,2	101,8	97,3	107,6	111,9	120,3	120,3	137
1992	103,7	106,9	134,4	129,1	129,8	109,8	100,5	102,6	117,1	101,3	101,3	113
1993	97,2	105,1	132,5	144,5	142,9	106,9	109	105,1	114,6	112,7	112,7	110,1
1994	99,9	100,4	137,8	137,3	133	107,3	97,8	104	113,6	106,6	106,6	95,1
1995	97,1	100,3	138,2	138,3	136,4	111,4	104	107,6	117,7	104,3	104,3	102,5
1996	102,9	116,7	138,8	141	139,9	109	106,8	102,8	113,6	102,1	102,1	95,8
1997	99,1	96,2	129,7	138	132,1	106,7	106,9	109,2	126,9	125,5	125,5	134,2
1998	164,3	170,4	201,5	176,3	146,1	107,1	100,2	102,6	124,4	143,4	143,4	129,7
1999	148,7	148,7	182,8	162,1	157,1	107,8	98,1	103,7	118,9	118,7	118,7	114,9
2000	129,2	142,4	160,6	159,1	160,6	112,8	107,4	109,6	121,6	127,9	127,9	138,1
2001	143,1	157,2	179,6	176,3	155,3	113,5	98,2	109,7	132,8	137	137	147,8
2002	153,5	150,5	169	160,2	151,1	112,5	112,9	120,1	118,3	127,6	127,6	144,7
2003	148,1	147,7	123,1	144	121,6	100,1	108,3	111,3	133,9	122,5	122,5	137,2
2004	136,9	146	179	154,8	129,3	115,6	122,1	110,2	126	119,6	119,6	123,9
2005	140,6	140,7	161,1	166,1	147,3	110,5	101,1	111,1	118,5	126,4	126,4	141,1
2006	135,2	136,9	158,1	158,7	132,4	116,8	109	105,1	120,9	125,1	125,1	130,4
2007	141,2	140,1	163,7	136,8	136,3	118,8	107,2	117,4	122,3	129,6	129,6	125,4
2008	147,7	155,8	164,2	154,6	140	108,9	104,4	100,7	121,8	126,7	126,7	143,9

Annexe 4 : Humidité relative : moyennes mensuelles des UX en % à la station synoptique de Natitingou.

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1979	34	33	59	78	91	96	97	97	97	96	84	45
1980	49	40	58	75	89	94	96	97	97	96	86	51
1981	33	39	65	82	93	95	97	98	96	95	60	39
1982	34	50	65	84	92	94	96	97	97	96	72	41
1983	30	40	37	77	89	95	97	97	97	86	63	48
1984	33	32	68	84	91	93	95	96	96	93	72	39
1985	34	27	60	82	87	91	95	97	97	90	70	37
1986	31	44	69	85	88	93	96	97	97	96	76	42
1987	36	42	60	62	83	93	96	97	97	95	72	49
1988	38	37	64	84	89	96	96	98	98	91	63	41
1989	30	28	65	77	85	93	96	96	95	91	65	47
1990	43	38	31	42	90	93	95	96	96	95	84	66
1991	36	58	74	86	94	95	97	98	97	97	77	44
1992	36	30	47	83	92	95	97	97	97	96	72	43
1993	33	40	70	79	93	95	97	98	98	97	87	48
1994	39	36	66	85	93	95	96	97	96	96	70	35
1995	32	29	64	81	89	92	96	97	97	95	69	59
1996	38	55	62	84	90	95	96	96	97	94	59	46
1997	39	27	54	84	93	94	95	96	96	94	80	44
1998	33	41	34	76	89	94	95	96	96	94	73	49
1999	35	48	72	79	85	89	94	96	96	93	67	40
2000	51	26	42	79	84	93	95	95	95	92	70	37
2001	32	30	55	76	88	92	94	95	95	86	62	40
2002	28	30	67	80	88	91	93	95	95	92	67	44
2003	31	51	43	82	89	93	94	95	95	93	77	47
2004	48	43	46	83	92	93	94	95	94	94	83	65
2005	47	53	74	81	90	94	95	95	95	93	69	53
2006	51	52	65	74	90	91	93	95	95	94	68	52
2007	44	47	56	87	93	93	95	96	95	94	86	57
2008	39	31	70	84	92	90	95	96	96	94	82	71

Annexe 4 bis : Humidité relative : moyennes mensuelles des UN en % à la station synoptique de Natitingou..

Années	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1979	15	10	25	33	49	60	62	66	62	52	34	19
1980	19	16	21	31	45	58	63	66	60	58	39	21
1981	14	16	24	38	52	54	66	67	58	50	21	15
1982	14	19	26	41	54	60	63	65	59	56	26	18
1983	17	16	18	34	49	61	65	64	62	33	21	18
1984	15	13	27	42	48	53	55	59	62	49	26	17
1985	14	12	24	38	47	54	62	64	62	38	22	15
1986	12	14	22	44	45	54	65	63	65	47	31	16
1987	14	12	23	21	41	56	56	64	62	51	22	17
1988	17	12	21	41	46	62	67	70	65	37	22	16
1989	12	11	22	32	41	55	64	67	62	45	23	22
1990	18	14	11	37	53	56	67	65	63	50	31	23
1991	16	20	31	43	58	61	69	72	64	55	26	18
1992	16	13	17	37	55	61	67	69	62	52	30	17
1993	16	16	29	33	53	60	67	66	64	57	37	20
1994	19	11	25	41	56	59	67	71	65	59	24	16
1995	15	11	23	40	48	56	63	67	63	53	27	23
1996	15	20	21	40	51	61	65	69	63	50	19	16
1997	14	11	22	40	55	64	65	64	62	54	29	15
1998	15	13	12	35	55	62	62	69	62	53	24	18
1999	14	16	27	36	45	50	65	69	64	49	21	14
2000	21	11	14	35	45	57	63	64	59	50	22	14
2001	12	12	16	34	48	55	64	68	62	38	18	15
2002	12	11	27	41	47	52	64	64	59	49	21	14
2003	10	16	14	43	49	61	65	66	62	53	32	19
2004	20	19	19	44	59	62	66	65	63	54	40	26
2005	24	23	30	42	54	62	66	71	64	47	23	18
2006	21	20	24	34	53	52	62	68	66	57	23	23
2007	23	22	24	53	60	62	68	70	66	58	35	24
2008	18	13	29	50	63	66	72	71	70	58	40	38

Annexe 5 : Paramètres physico-chimiques des eaux des points d'eau échantillonnés dans la Commune de Natitingou.

Arrondissement	Localité	Code	NS	pH	CE	TDS	T°C	salinité	HCO3
NATITINGOU 1	KANTCHAGOUTAMOU	FORAGE A2364	-	4,86	43,8	42	28,5	0	42
		puits moderne	4,47	6,27	366	355	27,8	0	78
	SOUNTCHIRATIKOU	puits moderne	3,63	4,59	315	304	27,2	0	36
	YOKOSSI	puits moderne	0,55	5,46	712	690	27,1	0	26
	BAGRI	puits moderne	3,47	5,68	1307	1268	28,8	0,4	68
	DJINDJIREBERI	puits moderne	4,29	5,82	3240	0Fl	28,2	1,6	58
	TCHIRIMINA	puits moderne	0,8	6,61	622	604	28,9	0	126
NATITINGOU 2	BORIYOURE	puits moderne	3,95	5,21	87,6	82	26,9	0,1	40
	BOCORO	FORAGE A2514	-	4,83	50,7	49,1	29,1	0	36
		puits moderne	14,94	5,96	188,4	183	29,5	0	30
	SANTA	puits moderne	3,75	5,96	1699	1648	28,7	0,7	74
	OURKPARBOU	puits moderne	1,57	6,88	478	464	29,2	0	106
	Ouroubona	A2465	-	6	584	567	28	0	134
		puits moderne	9,72	6,4	665	645	27	0,1	148
NATITINGOU 3	YETAPO	FORAGE A254	-	5,9	674	653	30	0	206
		puits moderne	3,74	6	239	232	29	0	64
	WINKE	FORAGE A2523	-	4,1	783	760	29	0,1	2
		puits moderne	2,09	5,7	1488	1444	28	0,6	56
	KANTABORIFA	FORAGE A2559	-	5,3	81,5	79	25,4	0	16
		puits moderne	1,55	5,1	373	361	29	0	50
	Ouroubouga	FORAGE A1250	-	6	47,8	46	27,6	0	26
		puits moderne	5,77	7,1	363	352	27,6	0	40
	GNIMPORIMA	FORAGE A2529	-	5,4	100,9	98	28,5	0	54
		puits moderne	0,96	6,8	592	573	28,7	0	166
	KOUSSANTIKOU	FORAGE A3040	-	5,3	69,4	67	28,3	0	44
	BERECINGOU	puits source	-	4,8	50,6	49	27	0	40
NATITINGOU 4	PEPORIYAKOU	FORAGE A2462	-	5,93	208	202	29,3	0	92
		puits moderne	0,59	5,74	145	141	29	0	74
	KABAKOUDENGOU	FORAGE A2527	-	6,39	416	404	29,7	0	150
		puits moderne	2,31	11,19	2120	0Fl	29,5	0,9	280
		puits traditionnel	3,1	5,15	105,5	102	28,4	0	28

Annexe 5 : Paramètres physico-chimiques des eaux des points d'eau échantillonnés dans la Commune de Natitingou (suite).

NATITINGOU 4	DOYAKOU	FORAGE A2556	-	6,75	278	270	29,1	0	162
		puits moderne	1,33	6,13	699	678	28,1	0,1	64
	DITANWAN	FORAGE A177	-	4,97	44,9	43	29,7	0	20
	TIKOUATI	FORAGE A2558	-	4,94	40	39	28,5	0	24
		puits moderne	4,35	4,82	271	263	28,3	0	48
	TETANTE	FORAGE A2833	-	4,93	137,3	133	28,3	0	18
KOTOPOUNGA	KOTA-MONONGOU	FORAGE A3214	-	4,76	44,6	43	28,3	0	26
		CHUTE D'EAU	-	6,82	24,9	24	22,8	0	42
	POUYA	FORAGE A3026	-	4,71	145,4	141	27,6	0	48
		puits moderne	11,07	5,93	263	255	27,1	0	36
	KOTOPOUNGA	FORAGE A1004	-	4,92	40,1	39	27	0	16
		puits moderne	11,5	4,53	604	586	26	0	31
	WETIPOUNGA	FORAGE A110	-	4,69	122	118	27,6	0	32
		puits moderne	2,4	5,52	259	251	27,5	0	54
	YARIKOU	FORAGE A2531	-	4,6	444	431	28	0	22
		puits moderne	4,44	6,21	572	556	26,7	0	80
	BANGRETAMOU	FORAGE A3002	-	4,6	90,1	87	28,1	0	46
		puits moderne	3,35	5,59	636	617	27,4	0,1	62
KOUABA	TAGAYE	FORGE A922	-	5,12	161,5	157	29,4	0	50
	KOUABA	FORAGE	-	5,84	177,1	172	29,4	0	76
		puits moderne	0,7	5,64	105,7	103	29,6	0	50
	KOUANWANRGOU	FORAGE A915	-	5,1	75,8	72	29,2	0	38
		puits moderne	2,14	6,24	174,4	169	27,3	0	94
	KOUTANONGOU	FORAGE A171	-	4,81	57,8	56	28,8	0	54
	MOUSSANSANMOU	FORAGE A172	-	5,62	148,4	144	29,4	0	84
		puits moderne	4,98	5,74	93,3	90	28,1	0	36
	TEDONTE	FORAGE	-	6,47	473	460	28,7	0	236
		puits moderne	0,47	6,35	485	470	27,5	0	90
KOUANDATA	TIGNINTI	FORAGE A900	-	5,6	375	364	30	0	114
	KOUNANDORGOU	FORAGE A2827	-	6,25	181,8	176	28,9	0	64
	KOUANDATA	FORAGE A2957	-	6,26	403	391	30,1	0	130
		puits moderne	2,31	6,32	442	428	29,2	0	60
	TIGNAMPETI	FORAGE A3044	-	6,4	888	861	29	0,2	208
		puits moderne	0,1	5,9	205	199	28	0	80

Annexe 5 : Paramètres physico-chimiques des eaux des points d'eau échantillonnés dans la Commune de Natitingou (suite et fin).

PERMA	KOUATERNA	FORAGE A2775	-	5,52	131,7	128	28,4	0	88
	KOKA	FORAGE A902	-	6,6	938	910	29	0,2	236
	PERMA	puits moderne	-	6,62	858	831	27,8	0,2	248
	PAM-PAM	FORAGE A2925	-	7,3	1661	1610	31,2	0,7	236
		puits moderne	0,64	5,92	332	322	29,8	0	174
	SINAÏCIRE	FORAGE A2952	-	6,33	551	534	30,1	0	130
		puits moderne	1,35	5,44	121,9	118	30,5	0	28
TCHOUMI-TCHOUMI	TCHOUMI-TCHOUMI	FORAGE A907	-	6,4	1201	1165	30	0,4	210
	MOUPEMOU	FORAGE A2955	-	6,7	845	820	30	0,2	224
CHAMP DE CAPTAGE	FN1B	FN1B	10,79	5,75	165,4	161	29,2	0	60
	FPT	FPT	-	5,42	78,5	76	29,3	0	30
	FN3	FN3	-	5,63	116,5	112	29	0	26
	FN7	FN7	15,5	5,85	174,9	168	29,1	0	38
	FN8	FN8	9,77	6,23	481	466	29,6	0	118
	FORAGE ST-PAUL	FORAGE ST-PAUL	-	6,07	201	194	28,7	0	70
	RIVIERE TIATIKO	RIVIERE TIATIKO	-	6,87	76,2	74	27,4	0	56
	EAU DU DECANTEUR	EAU DU DECANTEUR	-	6,64	164,6	160	27,5	0	44
	EAU TRAITEE SONEB	EAU TRAITEE SONEB	-	6,82	164,9	160	26,5	0	50
	EAU TRAITEE FORAGE	EAU TRAITEE FORAGE	-	5,76	190,7	185	28	0	46

Annexe 6 : Résultats d'analyse des paramètres chimiques des eaux échantillonnées dans la Commune de Natitingou.

Arrondissement	Localité	Code	Na	NH4	K	Mg	Ca	F	Cl	NO2	NO3	PO4	SO4	Br
NATITINGOU 1	KANTCHAGOUTAMOU	FORAGE A2364	2,4	0,23	1,16	0,44	1,91	0	1,4	0,02	0,62	0,06	0,02	0
		puits moderne	14,14	0,46	3,16	0,64	3,95	0	20	0	13,95	0,22	2,07	1,3
	SOUNTCHIRATIKOU	puits moderne	23,76	0,36	3,83	0,73	3,03	0	0,27	0	0,65	0,18	0	0,07
	YOKOSSI	puits moderne	20	0,29	4,64	12,44	27,97	0,01	0,43	0,04	1,22	0,2	0,12	0
	BAGRI	puits moderne	74	1,84	19,7	4,85	35,89	0	1,82	0,14	5,05	0,06	0,11	0,07
	DJINDJIREBERI	puits moderne	178,3	20,24	73,1	13,9	47,52	1,65	285	0	437,72	49,4	0,02	0
	TCHIRIMINA	puits moderne	18,81	1,1	9,51	14,1	27,66	0	13,1	0	13,77	0,64	2,81	0
NATITINGOU 2	BORIYOURE	puits moderne	4,19	0,07	1,23	0,37	2,9	0	20,6	0	70,37	0,18	0,05	0
	BOCORO	FORAGE A2514	3	1	2,18	0,27	1,6	0	2,09	0	0,35	0	0,15	0,05
		puits moderne	11,57	0,67	6,25	0,86	11,22	0,02	0,05	0	0,07	0,23	0,02	0,03
	SANTA	puits moderne	43,7	0	16,4	4,8	17,4	0	0	0,02	0,06	0,06	0,44	0,02
	OURKPARBOU	puits moderne	3,78	0	3,78	1,95	35,66	0	3,25	0	5,16	0,44	1,9	0
	Ouroubona	A2465	23,76	0,27	2,57	10,51	22,5	0	3,12	0	0,13	4,61	0,03	0
		puits moderne	8,64	0,48	5,05	10,84	41,25	0,05	9,41	0,15	4,83	4,77	0,03	0,1
NATITINGOU 3	YETAPO	FORAGE A254	18,76	0	3,98	12,4	28,29	0	3,12	0,97	1	1,33	0,03	0,03
		puits moderne	38,2	4,68	12,7	2,26	17,16	0	4,25	2,3	0,26	0,41	0,1	0,04
	WINKE	FORAGE A2523	24,56	3,07	14,1	4,6	28,94	0	27,3	0	96,28	0,25	0,31	0
		puits moderne	61,9	0,81	32,7	10,55	46,23	0,02	1,98	0,07	3,3	1,68	0,11	0
	KANTABORIFA	FORAGE A2559	2,98	0,46	2,03	0,82	9,44	1,01	1,6	0,05	0,57	4,1	0,04	0,1
		puits moderne	23,4	0	2,27	0,7	9,5	0,45	13,6	0,08	50,78	6,71	0,02	0
	Ouroubouga	FORAGE A1250	0,76	0,08	1,19	0,16	1,09	0	1,74	0,02	1,17	1,54	0,04	0,03
		puits moderne	13,15	0,12	1,81	1,34	14,35	0	18,4	0	54,7	0	1,38	0
	GNIMPORIMA	FORAGE A2529	4,62	0	2,36	0,3	5,95	0	2,77	0,02	1,27	0,16	0,04	0
		puits moderne	5,23	0	3,18	1,26	52,57	0	0,03	0,11	0,21	1,6	0,08	0,3
	KOUSSANTIKOU	FORAGE A3040	6,62	1,06	3,23	1,03	3,8	0	1,9	0,21	0,93	0,13	0,02	0
	BERECINGOU	puits source	1,68	0	0,61	1	2,61	0,48	1,7	0,1	1,22	1	0,13	0,03
NATITINGOU 4	PEPORIYAKOU	FORAGE A2462	78,12	0,98	20,8	5,14	37,68	0	0,09	0,02	0,03	0,47	0,1	0,04
		puits moderne	8,93	1,06	3,87	1,06	12,51	0	2,98	0,24	0,03	2,74	0,03	1,02
	KABAKOUDENGOU	FORAGE A2527	16,33	0,4	2,27	6,62	16,12	0	1,27	0,12	1,23	1,77	1,22	0,03
		puits moderne	3,3	7,1	28,6	0,17	67,96	0	0,11	0,14	0,02	0,08	0,03	0
		puits traditionnel	1,36	0,13	0,6	0,1	0,53	0	3,77	0	20,82	0,02	0,54	0,28
NATITINGOU 4	DOYAKOU	FORAGE A2556	22,74	0,4	1,31	7,27	29,81	0	0,15	0,01	0	0,43	0,03	0,36

Annexe 6 : Résultats d'analyse des paramètres chimiques des eaux échantillonnées dans la Commune de Natitingou (suite)

NATITINGOU 4		puits moderne	30,77	0,58	4,56	0,37	14,46	0	11	3,4	10,26	0,07	3,24	0
	DITANWAN	FORAGE A177	1,34	0,1	0,77	0,27	0,92	0	1,31	0,01	0,1	0,37	0,03	0,04
	TIKOUATI	FORAGE A2558	3,6	0,1	3,07	1,4	24,97	0	1,26	0	2,38	0,3	0,05	0
		puits moderne	6,93	0,47	8,1	2,55	9,57	0	10,9	0	37,13	1,4	1,78	0
	TETANTE	FORAGE A2833	37,76	4,4	20,9	0,93	10,48	0	8,15	0	10,31	0,4	0,23	0
KOTOPOUNGA	KOTA-MONONGOU	FORAGE A3214	1,91	0,12	0,94	0,35	1,38	0	2,9	0	4,32	0,23	0,06	0,05
		CHUTE D'EAU	0,6	0,04	0,8	0,38	1,52	0,01	0,1	0	0,04	0,04	0,13	0,23
	POUYA	FORAGE A3026	7,9	0,3	2,73	0,88	3,71	0	0,17	0,03	0,55	0,13	0,06	0
		puits moderne	15,5	0,92	8,71	1,08	13,15	0,4	9,71	0,7	27,11	3,43	0,02	0
	KOTOPOUNGA	FORAGE A1004	1,98	0,11	0,54	0,16	1,9	0,01	0,08	0,02	0,01	0,47	0,04	0
		puits moderne	19,03	0,34	11,2	3,3	14	0	25,5	0	133,7	0,62	0,73	0
	WETIPOUNGA	FORAGE A110	4,68	0,13	2,46	0,51	3,03	0	5,46	0	18,34	0,77	0,3	0
		puits moderne	17,67	0,52	4,27	0,35	5,8	0	5,57	0	18,05	0,33	0,08	0
	YARIKOU	FORAGE A2531	22,61	0,25	13,6	1,56	6,25	0,01	18,2	0,3	25,62	0,46	1,67	0
		puits moderne	16,1	0	11,7	1,35	29,23	0	16,8	0	39,43	7,67	0,02	0
	BANGRETAMOU	FORAGE A3002	3,73	0,11	1,73	0,43	2,92	0	6,1	0	10,51	0,05	0,36	0
		puits moderne	17,72	0,63	40,6	3,48	14,11	0	30,5	0	97,78	0,4	5,68	0
KOUABA	TAGAYE	FORGE A922	2,47	0	3,58	1,41	11,39	0	6,24	0,4	14,32	11	0,04	0
	KOUABA	FORAGE	1,56	0	3,2	1,35	11,49	0	3,43	0,3	6,03	1,52	0,03	0
		puits moderne	17,05	0,9	5,96	1,25	7,83	0	4,14	0,08	0,13	0,13	0,2	0
	KOUANWANRGOU	FORAGE A915	3,76	0,15	2,94	0,85	3,44	0	2,4	0	4,2	0,22	0,17	0
		puits moderne	2,33	0,2	0,87	0,96	5,26	0	2,73	0,02	2,46	0	0,63	0
	KOUTANONGOU	FORAGE A171	4,96	0,11	1,36	0,13	2,33	0	2,83	0	0,08	0,1	1,66	0
	MOUSSANSANMOU	FORAGE A172	4,68	0,2	1,65	3,37	6,5	0	1,16	0	1,06	0,11	1,45	0
		puits moderne	8,16	0,2	2,05	0,74	2,05	0	0,11	0	0,3	0,4	0,04	0
	TEDONTE	FORAGE	7,83	0,13	7,7	1,28	26,57	0	11,3	0	9,61	0,83	5,64	0
		puits moderne	16,84	1,64	12,5	0,67	5,65	0	11,3	0	11,83	0,75	7,17	0
KOUANDATA	TIGNINTI	FORAGE A900	17,84	0	5,27	3,05	14,3	0	1,35	0,04	0,05	1,11	0,3	0
	KOUNANDORGOU	FORAGE A2827	17,68	0,31	3,64	1,6	15,48	0	4,41	0	1,11	0,44	1,04	0,02
	KOUANDATA	FORAGE A2957	5,3	0,09	1,23	2,01	2,85	0	1,32	0	0	1,12	0,4	0
		puits moderne	25,87	0,5	2,64	0,32	14,34	0	27,1	0	30,43	0,17	2,12	0
	TIGNAMPETI	FORAGE A3044	31,21	0,47	5,05	10,06	52,02	0,02	0,06	0	0,06	0,26	0,17	0,1
		puits moderne	5,81	0,22	2,07	0,52	12,51	0	5,05	0,01	0,1	3,4	0,12	0

Annexe 6 : Résultats d'analyse des paramètres chimiques des eaux échantillonnées dans la Commune de Natitingou (suite et fin)

PERMA	KOUATERNA	FORAGE A2775	3	0,14	1,1	3,2	4,35	0	2,1	0	0,58	0,35	0,19	0,08
	KOKA	FORAGE A902	24,31	0,8	6,08	21,24	37,84	4,16	11,7	0	9,9	5,63	0,02	0
	PERMA	puits moderne	23,73	0,4	5,3	5,02	45,13	0,01	13,5	0	9,26	1,86	5,43	0,64
	PAM-PAM	FORAGE A2925	55,25	2,57	21,7	19,83	58,31	0	5,4	0	0,2	0,04	174,7	0,02
		puits moderne	16,02	0,38	4,26	3,54	9,01	0	24,3	0	18,8	0	5,38	0,75
	SINAÏCIRE	FORAGE A2952	13,97	0,41	7,3	0,7	14,3	0	1,93	0	0,24	0,08	0,98	0,04
		puits moderne	32,82	1,5	11,9	3,07	16,14	0	2,15	0	11,72	0,16	3,24	0
TCHOUMI-TCHOUMI	TCHOUMI-TCHOUMI	FORAGE A907	27,62	0	6,21	14,41	70,26	1,45	4	0	0,02	228	0,62	0,02
	MOUPEMOU	FORAGE A2955	6,48	0	1,98	5,52	13,95	0	0,01	0	0,18	0,08	0,13	0,05
CHAMP DE CAPTAGE	FN1B	FN1B	0,16	0	0,07	0,1	0,64	0,02	5,3	0,03	4,8	0,06	0,05	0
	FPT	FPT	3,63	0,3	1,36	1,2	3,03	0	4,13	0	5,43	0	0,86	0
	FN3	FN3	4,74	0,2	2,15	0,9	4,85	0	4,27	1,06	6,73	0,03	0,11	0,77
	FN7	FN7	0,13	0	0,07	0,08	0,55	0	1,05	0,26	0,92	0,45	0,4	0,13
	FN8	FN8	5,06	0,13	1,04	12,32	18,72	0	1,14	0	0,37	0,83	0,02	0,03
	FORAGE ST-PAUL	Forage st-Paul	4,88	0,4	1,93	4,23	8,5	0	1,31	0,03	1,52	0,31	0,73	0,03
	RIVIERE TIATIKO	Rivières Tiatiko	3,1	0,26	1,3	1,64	3,34	0	0,02	0,06	0	0,17	0,08	0,02
	EAU DU DECANTEUR	Eau du décanteurs	2,1	0,25	1,23	1,55	8,87	0	2,31	0,28	2,1	0,5	29,24	0,2
	EAU TRAITEE SONEB	Eau traitée Soneb	2,9	0,33	1,4	0,51	2,12	0	0	0,05	0,02	0,3	0,02	0,05
	EAU TRAITEE FORAGE	Eau traitée forage	4,54	0,2	1,4	2,65	7,66	0	2,8	0	4,6	0,1	0,5	0,32